

**IDENTIFICACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE CLOROFILA- α MEDIANTE
IMÁGENES DE SATÉLITE EN SISTEMAS ACUÁTICOS**

ZAHIA CATALINA MERCHÁN CAMARGO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA
2018**

**IDENTIFICACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE CLOROFILA- α MEDIANTE
IMÁGENES DE SATÉLITE EN SISTEMAS ACUÁTICOS**

**ZAHIA CATALINA MERCHÁN CAMARGO
COD. 201310091**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Ambiental**

**Director
PABLO ANDRÉS GIL LEGUIZAMÓN
MSc. Ingeniería Ambiental**

**Codirector
NELSON JAVIER ARANGUREN RIAÑO
PhD. Ciencias-Biología**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TUNJA
2018**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Tunja, mayo de 2018

“La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde de la opinión expresada en este proyecto”.
Se autoriza la reproducción total o parcial indicando su origen.

Dedicada a:

Dios, por ser guía y apoyo de mis pasos, por despertar en mí, curiosidad para descubrir y recorrer la vida.

A la naturaleza y su complejidad, al espíritu del agua por inspirarme y envolverme con su magia.

A mis padres, por heredarme la pasión por investigar...

A mi madre Indira, por enseñarme que no hay límites para soñar, por animarme a volar y creer en mis sueños. Por recorrer desde mi gestación la magia de los sistemas naturales.

A mi padre Heduar, por ser mi fortaleza y mi polo a tierra, por enseñarme a luchar, construir un pensamiento crítico y despertar en mí la pasión por el mundo de los números y la ingeniería.

A mis hermanas, Karen, Gabriela e Isabela, por crecer junto a mí, por ser mi inspiración y orgullo, por regalarme su alegría y amor.

A mi familia, cada palabra de aliento, amor, apoyo incondicional, abrazo y sonrisa. A mis Nonitos Josefina y Ramón, mis Abuelos Gonzalo y Blanca, por llenar mi vida de dulzura y amor y compartir la experiencia de vivir.

A mis queridos amigos: Leana Molina, Mónica Díaz, Gabriela Fuentes, Nelson Aranguren, Paula López, Paola López, Camilo Vargas; por estar junto a mí en el camino de la vida, por compartir cada sonrisa, palabra e historia, por trascender en mi vida y en lo que soy.

“Es vana la pretensión de encerrar toda la Naturaleza en los sistemas de ecuaciones diferenciales tan caras a los ecólogos y, a fin de cuentas, puede ser más efectivo sentarse a ver discurrir las aguas de un río y a escuchar el susurro de las hojas de los árboles”.

Ramón Margalef

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por abrir sus puertas, generar espacios de investigación, academia y crecimiento personal.

Con infinita gratitud y aprecio, a mis directores: Pablo Gil Leguizamón, profesor de la facultad de ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y Nelson Aranguren Riaño, profesor de la Facultad de Ciencias, escuela de Biología de Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; por sus valiosos aportes, acompañamiento, dedicación y apoyo en el transcurso de este proceso enriquecedor y valioso para mí.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Ambiental y de la UPTC, quienes me brindaron su saber y marcaron mi crecimiento formativo y académico.

A los integrantes del grupo de investigación UDESA, de la UPTC por el acompañamiento a lo largo de este camino, por sus aportes, apoyo en la fase de campo, amistad y espacios de aprendizaje que fortalecieron mi formación profesional.

A las biólogas, Ana Zábala, Bióloga de la Universidad de Antioquia; Claudia Muñoz, Bióloga de la UPTC y PhD Esnedy Hernández de la Universidad de Antioquia; por su colaboración con la información de datos de campo.

A las biólogas, Ángela Zapata de la Universidad Javeriana de Colombia y PhD Angélica Yohana Cardozo, de Universidad Federal da Bahía, por su apoyo y orientación de la fase de laboratorio.

A los investigadores Matías Bonansea, de la Universidad de Rio Cuarto (Argentina) Alexander Bocharov e ingeniero Carlos Meza, profesor de la Universidad UNIPAZ por su orientación y asesorías con las imágenes de satélite.

A la Escuela de Ciencias Químicas y la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su apoyo y préstamo de equipos y reactivos de laboratorio, especialmente a: Ana Lucy Pérez, directora de laboratorios de la escuela de Biología; José Jobanny Martínez, director de la escuela de Ciencias Químicas y al profesor Leopoldo Arrieta.

Al ingeniero Ricardo Puerto, de la facultad de Ingeniería de la UPTC por su disposición, colaboración y préstamo de reactivos para la fase de laboratorio.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO REFERENCIAL	21
2.1 ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS	21
2.2 HUMEDALES	21
2.3 ECOSISTEMAS LÉNTICOS	21
2.4 ESTADO TRÓFICO	23
2.5 FITOPLANCTON	25
2.6 CLOROFILA- <i>a</i>	26
2.7 TELEDETECCIÓN	26
2.8 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA EN EL ESPECTRO ÓPTICO	29
3. METODOLOGÍA	30
3.1 ÁREAS DE ESTUDIO	30
3.1.1 Caso 1: Ciénaga de Ayapel	30
3.2 BÚSQUEDA DE REGISTROS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA- α .	34
3.2.1 Caso 1	34
3.2.2 Caso 2.	35
3.3 INFORMACIÓN SATELITAL	37
3.4 CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE.	37

3.5 IMÁGENES SELECCIONADAS	39
3.6 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.	40
3.6.1 Correcciones geométricas	40
3.6.2 Recorte de la ventana de trabajo	40
3.6.3 Correcciones radiométricas	41
3.7 CÁLCULO DE MODELOS	44
3.8 VALIDACIÓN DEL MODELO	45
3.9 APLICACIÓN DEL MODELO	45
3.10 ZONIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.	45
3.11 VALORACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO.	48
4. RESULTADOS	49
4.1 CASO 1. CIÉNAGA DE AYAPEL	49
4.1.1 Información de referencia	49
4.1.2 Preprocesamiento de las imágenes de satélite.	51
4.1.3 Cálculo de modelos	51
4.1.4 Validación del modelo.	53
4.1.5 Aplicación del modelo	54
4.1.6 Variación espacio temporal de clorofila-a	57
4.2 CASO 2. LAGO DE TOTA.	71
4.2.1 Información de referencia	71
4.2.2 Preprocesamiento de las imágenes de satélite	73
4.2.3 Cálculo de modelos	74
4.2.4 Validación del modelo	76
4.2.5 Aplicación del modelo	77

4.2.6 Variación espacial de clorofila- <i>a</i>	78
4.2.7 Valoración del estado trófico	80
5. ANÁLISIS	81
5.1 CIÉNAGA AYAPEL	81
5.1.1 Información Satelital.	81
5.1.2 Clorofila- <i>a</i>	82
5.2 LAGO DE TOTA	86
5.2.1 Información satelital	86
5.2.2 Clorofila- <i>a</i> .	87
4. CONCLUSIONES	89
5. RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	99

LISTAS DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Rangos espectrales del sensor Landsat 8 (OLI_TIRS)	39
Tabla 2. Listado de imágenes seleccionadas para cada sistema acuático, agrupadas según la característica hidrológica.	39
Tabla 3. Especificaciones del sensor Landsat-8, con código de reflectancia superficial.	42
Tabla 4. Clasificación de estado trófico para el índice de Carlson (IET).	48
Tabla 5. Clasificación de estado trófico para el índice de Carlson modificado (IETm)	48
Tabla 6. Concentraciones de clorofila- <i>a</i> (<i>in-situ</i>) registradas en la Ciénaga de Ayapel para los periodos de aguas bajas en ascenso (septiembre, octubre de 2015) y aguas altas en descenso (diciembre, 2015) en las diferentes estaciones de muestreo.	49
Tabla 7. Registro de variables fisicoquímicas en diferentes sectores de la Ciénaga de Ayapel en los periodos de muestreo <i>in-situ</i> .	50
Tabla 8. Valores de reflectancia para las diferentes estaciones de muestreo (septiembre 2015).	51
Tabla 9. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila- <i>a</i> , a partir de regresiones múltiples en la Ciénaga de Ayapel.	52
Tabla 10. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila- <i>a</i> , a partir de regresiones simples en la Ciénaga de Ayapel.	52
Tabla 11. Estadísticas de la regresión múltiple seleccionada.	53
Tabla 12. Coeficientes de variación (CV) de los datos de clorofila- <i>a</i> tomados <i>in-situ</i> respecto a los valores calculados de la información satelital para la Ciénaga de Ayapel.	53
Tabla 13. Concentraciones de clorofila- <i>a</i> (<i>in-situ</i>) tomadas el 22 de enero de 2018, para diferentes estaciones ubicadas en el Lago de Tota.	72

Tabla 14. Registro de variables fisicoquímicas tomadas <i>in-situ</i> en diferentes estaciones del Lago de Tota.	72
Tabla 15. Valores de reflectancia extraídos de la imagen satelital (enero 2018) para las diferentes estaciones de muestreo en el lago de Tota.	73
Tabla 16. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones simples en el Lago de Tota.	75
Tabla 17. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones múltiples en el Lago de Tota.	75
Tabla 18. Estadísticas de la regresión seleccionada.	76
Tabla 19. Coeficientes de variación (CV) de los datos de clorofila-a tomados in-situ con respecto a los valores calculados de la información satelital para el Lago de Tota.	76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización geográfica de la Ciénaga de Ayapel, departamento Córdoba- Colombia.	31
Figura 2. Patrón típico de variación de volúmenes almacenados en la Ciénaga de Ayapel.	32
Figura 3. Localización geográfica del Lago de Tota, departamento Boyacá- Colombia.	33
Figura 4. Ubicación espacial de las estaciones de muestreo en la ciénaga de Ayapel.	35
Figura 5. Ubicación espacial de las estaciones de muestreo en el Lago de Tota.	36
Figura 6. Recorte de la imagen Landsat-8 (enero2018). Izquierda imagen completa, derecha área seleccionada a partir del polígono de referencia de la Ciénaga de Ayapel para el periodo de aguas en descenso (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).	41
Figura 7. Recorte de la imagen Landsat-8 (enero2018). Izquierda imagen completa, derecha área seleccionada a partir del polígono de referencia del Lago de Tota, (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).	41
Figura 8. Esquema de conversión de los valores de resolución radiométrica (16 bits) a valores de reflectancia (rango 0-1).	43
Figura 9. Resultado de la corrección radiométrica para la Ciénaga de Ayapel. A. Imagen sin corrección radiométrica; B. Imagen corregida (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).	43
Figura 10. Resultado de la corrección radiométrica para el lago de Tota. A. Imagen sin corrección radiométrica; B. Imagen corregida (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).	44
Figura 11. Zonificación de la Ciénaga de Ayapel	46
Figura 12. Zonificación del lago de Tota.	47

Figura 13. Relación entre los valores de clorofila- <i>a</i> calculados del modelo de regresión y los valores clorofila- <i>a</i> medidas <i>in-situ</i> para la Ciénaga de Ayapel.	54
Figura 14. Izquierda, salida gráfica de la distribución de la concentración de clorofila- <i>a</i> , aplicación del modelo en la ciénaga de Ayapel, septiembre de 2015. Derecha, histograma de la concentración de clorofila- <i>a</i> .	54
Figura 15. Histogramas de distribución de concentración de clorofila- <i>a</i> para las imágenes Landsat-8, Ciénaga de Ayapel.	56
Figura 16. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> , periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso.	58
Figura 17. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso.	59
Figura 18. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> , periodo hidrológico de aguas altas.	60
Figura 19. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas altas.	61
Figura 20. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> , periodo hidrológico de aguas altas en descenso.	62
Figura 21. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas altas en descenso.	63
Figura 22. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> , periodo hidrológico de aguas bajas.	65
Figura 23. Distribución espacial de la concentración de clorofila- <i>a</i> para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas bajas.	66
Figura 24. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila- <i>a</i> , para el periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso.	68
Figura 25. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila- <i>a</i> , para el periodo hidrológico de aguas altas.	69
Figura 26. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila- <i>a</i> , para el periodo hidrológico de aguas altas en descenso.	70

Figura 27. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el periodo hidrológico de aguas bajas.	71
Figura 28. Regresión lineal simple que muestra la relación entre los valores de reflectancia y las concentraciones de clorofila-a medidas en campo.	75
Figura 29. Relación entre los valores de clorofila-a estimada del modelo de regresión y los valores clorofila-a medidas <i>in-situ</i> para el Lago de Tota.	76
Figura 30. Izquierda, salida gráfica de la distribución espacial de la concentración de clorofila-a, aplicación del modelo en el Lago de Tota (enero de 2018). Derecha, histograma de la concentración de clorofila-a.	77
Figura 31. Espacialización de la concentración de clorofila-a en el Lago de Tota para enero 2018.	78
Figura 32. Espacialización de la concentración de clorofila-a para cada zona en el Lago de Tota (enero 2018).	79
Figura 33. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el Lago de Tota (enero 2018).	80

ANEXOS

	pág.
Anexo A. Correo de comunicación con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).	100
Anexo B. Salidas gráficas. (Medio magnético, CD).	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

En este estudio se presenta el uso de imágenes de satélite Landsat-8 (SR) como herramienta de monitoreo de procesos funcionales en ecosistemas acuáticos complementarios a las técnicas *in-situ*. Con el objetivo de determinar la variación espacial y temporal de la distribución de concentración de clorofila-a y de la condición trófica de dos ecosistemas acuáticos con condiciones ambientales contrastantes, la Ciénaga de Ayapel (Córdoba) y el Lago de Tota (Boyacá), se generaron modelos de regresión a partir de la reflectancia de las diferentes bandas del espectro electromagnético, obtenida de las imágenes y de datos tomados en campo en cada sistema.

Los resultados indicaron que, para la ciénaga de Ayapel se presentó buena correlación entre variables ($r^2=0,563$), derivado de un modelo de regresión múltiple (para la combinación de bandas: b3, b2, y b5/b4). En contraste, el modelo calculado para el Lago de Tota no presentó buena correlación, ($r^2=0,151$) derivado de un modelo de regresión simple (para la combinación de bandas: promedio b3 y b4). Esto debido a que el uso de imágenes satelitales está condicionado por la profundidad de los ecosistemas acuáticos y por la presencia de sólidos disueltos y suspendidos.

Los modelos estimados, se aplicaron a diferentes imágenes de satélite en donde se evaluó: la variación de la distribución espacial de clorofila-a en diferentes zonas, adicionalmente, para el caso de la Ciénaga de Ayapel se evaluó la variación a nivel temporal asociada a 4 periodos hidrológicos (aguas bajas en ascenso, aguas altas, aguas altas en descenso y aguas bajas).

En general, esta herramienta se considera útil a pesar de las limitaciones para cuerpos de agua profundos; debido al bajo costo, nivel de resolución, alcance en plan de monitoreos y a que se podría implementar mayoría de ecosistemas acuáticos en el trópico.

INTRODUCCIÓN

Colombia presenta una gran riqueza de sistemas acuáticos, actualmente están descritos al menos 55 tipos de humedales, con 48.473 registros. Su clasificación reconoce el origen y los procesos funcionales, asociados de manera jerárquica como la geomorfología, la hidrología y la vegetación. Así mismo, las propiedades químicas y físicas del agua, condicionan sus funciones en términos de productividad, biodiversidad y estabilidad¹. En este contexto las características limnológicas de estos sistemas, varían espacial y temporalmente debido a los regímenes climáticos e hidrológicos particulares, ubicación altitudinal, tipo, origen y geología de sus cuencas².

Los humedales además de ser influenciados por la variabilidad natural, son también sometidos constantemente a condiciones de estrés, producto de las actividades humanas, hecho evidente en la acelerada tasa de degradación de la calidad y disponibilidad del agua, factores que modifican la estructura, procesos, funciones de los ecosistemas, así como el desarrollo económico y social de las comunidades³. Uno de los efectos, es la eutrofización, asociado al incremento de la productividad, simplificación de comunidades bióticas y la reducción de la habilidad de los organismos a adaptarse a nuevas condiciones, efectos que alteran la estabilidad del sistema⁴.

Debido a esto, es necesario intensificar los estudios en los ecosistemas acuáticos para entender las propiedades funcionales de los mismos, además de posibilitar la evaluación, predicción y compensación de la influencia de los factores tensionantes en el metabolismo del sistema y así lograr su adecuada gestión⁵. Los programas de monitoreo son alternativas complementarias para hacer seguimiento y comprender dichos procesos. De esta forma se hace eficiente la gestión y conservación del recurso hídrico. Según Tundisi & Matsumura-Tundisi⁶, una base de datos consolidada y transformada en un instrumento de gestión puede ser una de las formas más fáciles de enfrentar los problemas de escasez, estrés y deterioro de la calidad del agua.

Uno de los criterios más recomendado para evaluar el estado ambiental de un

¹ JARAMILLO, Úrsula, *et al.* Colombia Anfibia. País de humedales. Vol 1. Bogotá: I.d. Alexander von Humboldt, 2016. p. 10-132.

² HERNÁNDEZ, Esnedy, *et al.* Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes lénticos de Colombia. *En:* Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Diciembre, 2013, no. 69. p. 217.

³ YAN, Xiao, *et al.* Mechanisms and assessment of water eutrophication. *En:* Journal of Zhejiang University Science B. 2008, vol. 9, no.3. p. 197-198.

⁴ WETZEL, Robert. Limnology, Third Edition. 3rd ed. San Diego, 2001. p. 3-6.

⁵ Ibid., p. 4.

⁶ TUNDISI, J y MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnologia. Citado por TUNDISI, J. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *En:* Estudos avançados. 2008, vol. 22, no.63. p. 7.

sistema acuático y en consecuencia el estado trófico, es utilizar la clorofila-a como variable que permite estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, ya que una de las consecuencias de la eutrofización es el crecimiento masivo de algas⁷.

La clorofila-a tiene patrones espaciales y temporales complejos, es el resultado de factores físicos, químicos y biológicos. Dichas variaciones pueden darse a nivel de: 1. macro escalas como resultado del crecimiento diferencial que surge de gradientes de nutrientes, 2. escalas más pequeñas, relacionadas con los patrones del viento, temperatura y las características de flotación del fitoplancton⁸.

Estos monitoreos que involucran la toma de muestras *in-situ* de clorofila-a, son muy satisfactorios en términos de precisión, sin embargo, usualmente son costosos y limitados en términos de acceso a un amplio espectro espacial y temporal⁹. La necesidad de un sistema efectivo de monitoreo es facilitado por el uso de técnicas de percepción remota, las cuales permiten adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, mediante un mecanismo de transporte de energía electromagnética, natural o artificial¹⁰. En consecuencia, las imágenes de satélites multispectrales han sido ampliamente utilizadas por la capacidad de superar las limitaciones de las mediciones tradicionales. Debido a sus características de alta resolución, disponibilidad, pueden llegar a ser fundamentales para desarrollar protocolos de monitoreo¹¹.

El uso de imágenes de satélite en el manejo de los humedales está basado en el hecho de que la variación de la cantidad de clorofila-a tiene un efecto distintivo en el espectro de reflectancia del agua. Así, las causas de la eutrofización aumentan la productividad y esto se asocia en el cambio de las propiedades ópticas del agua. Los aumentos en la clorofila-a están asociados con una disminución en la cantidad relativa de energía en la longitud de onda azul (0.45-0.52 μm) y aumento en la longitud de onda verde (0.52-0.60 μm)¹².

⁷ HERNÁNDEZ, Esneddy, *et al.* Relación entre la determinación del pigmento Clorofila-a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). En: Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Septiembre, 2011, no. 60. p. 159.

⁸ NAS. B. *et al.* Mapping chlorophyll-a through *in-situ* measurements and Terra ASTER satellite data. En: Environmental Monitoring Assessment. September, 2009, vol. 157. p. 376.

⁹ THEOLOGOU, I. *et al.* Multitemporal Mapping of Chlorophyll-a in Lake Karla from High Resolution Multispectral Satellite data. En: Environmental Processes. Mayo, 2016, vol. 3. p. 682.

¹⁰ CHUVIECO, E. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ariel S.A. Barcelona, 2002. p. 17-18.

¹¹ THEOLOGOU, I, *et al.* Op. Cit., p. 683.

¹² BABAN, S. Use of remote sensing and geographical information systems in developing lake management strategies. Citado por NAS. B. *et al.* Op. cit. p. 376.

Combinar las mediciones *in-situ* y los datos satelitales, puede resultar útil para optimizar las investigaciones; sin embargo, deben desarrollarse ecuaciones de regresión apropiadas, adaptadas a las condiciones físicas y geográficas locales (regionales) para obtener características correctas de los cuerpos de agua¹³. En Colombia, la implementación de estas herramientas tecnológicas para evaluación de condiciones ecológicas de lagos y su variabilidad espacio temporal es aún muy limitada.

Por lo cual, este estudio tiene por objetivo evaluar la viabilidad de implementar técnicas de percepción remota para el análisis de la variación espacial y temporal de la concentración de clorofila-*a* en dos sistemas acuáticos contrastantes como son la Ciénaga de Ayapel (Córdoba) y Lago de Tota (Boyacá).

¹³ BOCHAROV, Alexander, *et al.* Monitoring of Chlorophyll in Water Reservoirs Using Satellite Data. En: Journal of Applied Spectroscopy. March-april, 2017, vol. 84, no. 2. p. 291.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la variación espacio temporal de la concentración de la clorofila-a en sistemas acuáticos, caso Ciénaga de Ayapel (Córdoba) y Lago de Tota (Boyacá) mediante imágenes de satélite.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar técnicas de percepción remota para el análisis de la variación espacio temporal de la concentración de clorofila-a en sistemas acuáticos, caso Ciénaga de Ayapel y Lago de Tota.
- Generar una ecuación que permita determinar la concentración de clorofila-a en los sistemas acuáticos a partir de las reflectancias obtenidas de las imágenes satelitales.
- Valorar el estado trófico de los sistemas acuáticos a partir de las concentraciones obtenidas de la clorofila-a.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS

Se trata en principio de un lugar especial con significados y valores únicos para un determinado grupo social, en un momento dado de su historia. Así mismo es posible aproximar otra definición de Ecosistema Estratégico a partir de objetivos conservacionistas, como una porción geográfica, concreta, delimitable, en la cual la oferta ambiental, natural o inducida por el hombre genera un conjunto de bienes y servicios ambientales, imprescindibles para la población que los define como tales. Es la forma como el hombre percibe el valor de existencia de la naturaleza. Puede decirse que adjetivar de esta manera a un ecosistema es producto de la percepción del ser humano, por tanto, debiera entenderse como una categoría social, no natural, en la medida en que el carácter de estratégico lo asigna un grupo social en función de sus propios intereses¹⁴.

Los ecosistemas estratégicos deben entenderse como partes diferenciables del territorio donde se concentran funciones naturales de las cuales dependen, de manera especial y significativa, bienes y servicios ecológicos vitales para el mantenimiento de la sociedad y de la naturaleza¹⁵.

2.2 HUMEDALES

Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros¹⁶.

2.3 ECOSISTEMAS LÉNTICOS

Los sistemas lénticos tienen una estructura característica establecida por su origen, ya que influye directamente en la morfología de la cubeta, los parámetros más importantes a controlar son el área del espejo de agua, la

¹⁴ AGUDELO, L.C. La ciudad sostenible: dependencia ecológica y relaciones regionales; un estudio de caso en el área metropolitana de Medellín, Colombia. Citado por HERRERA, A. Ecosistemas estratégicos, análisis crítico del concepto fundamentos ... Medellín, 2014. p.51, 52.

¹⁵ MÁRQUEZ. Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental. Citado por HERRERA, A. Ecosistemas estratégicos, análisis crítico del concepto fundamentos ... Medellín.2014. p. 52.

¹⁶ SECRETARÍA DE LA CONVENCIÓN DE RAMSAR. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, (Suiza). 2013. p. 7.

profundidad máxima, las profundidades relativas al perímetro de la cubeta, así como la extensión de la ribera o desarrollo de ribera por el aporte de material desde la cuenca de drenaje"¹⁷.

Dentro de estos ecosistemas se encuentran los lagos:

Sus características morfológicas, así como su ubicación (latitud y longitud) permiten pronosticar a su vez el comportamiento lumínico y térmico de estos sistemas debido a la cantidad de energía que reciben y acumulan, lo cual influye directamente en su productividad. La cantidad de luz que es absorbida por un cuerpo de agua aumenta exponencialmente con la distancia del paso de la luz por la solución¹⁸.

Entre las variables físicas cabe destacar el clima óptico y térmico en los lagos y entre las variables químicas, los gases disueltos (oxígeno y anhídrido carbónico) y sales minerales conocidas como nutrientes (nitratos y fosfatos). La calidad química del agua de ríos y lagos depende de la cantidad y calidad de las precipitaciones, de la calidad de los suelos del área de drenaje, la erosión, los procesos de solubilización, meteorización de la roca madre y los suelos, así como la evaporación y sedimentación¹⁹.

Por efecto de la estacionalidad climática, las comunidades biológicas, especialmente el plancton, presentan ciclos diarios, y estacionales. Este cambio influye directamente en la composición química de las aguas, especialmente en los nutrientes que son requeridos para la fotosíntesis"²⁰.

En esta categoría de sistemas lénticos, también están las planicies de inundación, se caracterizan por ser áreas que se inundan periódicamente debido al sobre flujo lateral de los ríos o por precipitación directa sobre la cuenca de drenaje, dando como resultado un ambiente fisicoquímico cambiante y dinámico, en el que la hidrología y los flujos de materiales condicionan la estabilidad y la diversidad de las comunidades allí presentes²¹.

Según el grado de conectividad de estos cuerpos de agua con los ríos, estos ambientes reciben agua durante las crecientes y durante los períodos secos vierten aguas al río, para mantener así sus niveles. Estos ciclos marcan estaciones muy definidas asociadas también a ciclos de producción, consumo

¹⁷ VILA, I. Los sistemas acuáticos continentales. Su ontogenia natural acelerada por efecto antrópico: la eutrofización y la salinización. CYTED-XVII. Santiago de Chile, 2003. p.1.

¹⁸ Ibid., p. 1.

¹⁹ Ibid., p. 1.

²⁰ Ibid., p. 2.

²¹ JUNK, W, *et al.* General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplain. Citado por JARAMILLO, Juan. Cambios espacio-temporales del plancton en la ciénaga de Ayapel (Córdoba-Colombia), durante la época de menor nivel del agua. En: Limnología. 2012, vol. 34. p. 214.

y reproducción de los organismos que las habitan. Las variaciones estacionales del volumen de agua en el interior de estos sistemas están asociadas a la precipitación, a los flujos de aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneos y a la evapotranspiración²².

En Colombia, las planicies de inundación son regionalmente denominadas “ciénagas” y se definen como ecosistemas de poca profundidad (usualmente no sobrepasan los 6 m), están localizadas a alturas inferiores a 1000 metros sobre el nivel del mar, poseen una temperatura superior a los 25 °C y precipitaciones mayores a 2000 mm anuales. Colombia posee cerca de 1938 ciénagas que ocupan 4785 km², cobertura que las sitúa como el principal sistema lenticó del país²³. Se ubican como macrounidades geomorfológicas en los que predominan procesos de dinámica fluvial (erosión, depositación e inundación, entre otros)²⁴.

2.4 ESTADO TRÓFICO

Este concepto fue elaborado por Naumann²⁵ durante los años 1919, 1929, en el que destacó la importancia de la cuenca de drenaje para el funcionamiento de un lago como ecosistema. Hizo hincapié en que la cantidad y posterior producción de algas fitoplanctónicas, se debe en particular a la presencia de fósforo y nitrógeno. Esta producción se tradujo en una mayor productividad de los niveles tróficos superiores de la biología de los lagos. Señaló también la importancia de las variaciones regionales en la producción de algas en relación con la geología de las cuencas de drenaje.

El autor define²⁶ los términos oligotrofia para lagos de baja producción y eutrofia para lagos de alta productividad. A su vez unifica los tipos de los lagos tróficos a los factores físicos (temperatura y luz) y químicos (calcio, contenido húmico, nitrógeno, fósforo, hierro, pH, oxígeno y CO₂) que afectan la producción. El criterio utilizado para la clasificación fue la producción de materia orgánica, no los factores que determinan esa producción.

Thienemann en 1921, en cambio determinó que:

La producción de fitoplancton en algunos de lagos se ve afectada en mayor medida por factores distintos de los nutrientes primarios fósforo

²² NEIFF, J. El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. Citado por JARAMILLO, Juan. Op. cit. p. 214.

²³ ARIAS, P. Las ciénagas en Colombia. 1985. Citado por JARAMILLO, Juan. Op. cit. p. 214.

²⁴ NEIFF, J. Op. cit. p. 214.

²⁵ NAUMANN. The scope and chief problems of regional limnology. Citado por WETZEL, R. Op. cit. p. 273.

²⁶ Ibid., p. 273.

y nitrógeno. Los criterios de producción primaria se combinan con un sistema de clasificación basado en concentraciones hipolimnéticas de oxígeno en lagos estratificados y a la presencia de macroinvertebrados bénticos. Las excepciones al esquema de clasificación general surgieron rápidamente, particularmente en relación con las tasas de agotamiento de oxígeno hipolimnético que están fuertemente acopladas a la temperatura y las diferencias en la morfometría de la cuenca²⁷.

Estos problemas pueden evitarse si la clasificación de los lagos se hace sobre la base de la producción (biomasa) en lugar de tratar de incorporar todas las variables causales de limitación y estructura biológica, así como las consecuencias biológicas y abióticas de esa producción. Un desarrollo más reciente es el uso de variables únicas para definir el estado trófico de los lagos, en donde se evalúan muchas variables en el contexto de la productividad de algas (por ejemplo, cargas y concentraciones de fósforo, concentraciones de clorofila, productividad de algas, biomasa de algas, déficit de oxígeno hipolimnético, etc.)²⁸.

Vollenweider²⁹, establece una clasificación para determinar el estado trófico como oligotrófico, mesotrófico, eutrófico o hipereutrófico, relaciona el tiempo de residencia hidráulico y la concentración de fósforo de entrada, además realiza la sub-clasificación de "ligeramente" o "fuertemente" que se aplica al nombre del estado trófico. Wetzel³⁰ considera que la organización a lo largo de un continuo trófico no es sino una faceta de la tipología del lago y utiliza la biomasa o las tasas de producción como la definición original, más simple y más útil del estado trófico²⁹.

La eutrofización consiste en:

Forzar un sistema acuático desde el exterior, con la incorporación de nutrientes generalmente nitrógeno y fósforo, en ocasiones, sílice, potasio, calcio, hierro, manganeso y materia orgánica, que alteran temporalmente las condiciones de equilibrio, induciendo desviaciones en las características del sistema, en su composición biótica y en su sucesión³¹.

²⁷ THIENEMANN, S. Naturwissenschaften. Citado por WETZEL, R. Op. cit. p. 273-274.

²⁸ WETZEL, R. Op. cit. p. 274.

²⁹ VOLLENWEIDER, R. Fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water, with particular reference to N and P as factors in eutrophication. Citado por CASTELLANO, S. Trophic State Analysis of Selected Water Bodies in Grand Teton National Park. Tesis Master. Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering. 2013. p. 149.

³⁰ WETZEL. Op. cit. p. 274.

³¹ MARGALEF, R, *et al.* Limnología de los embalses españoles. Citado por MORENO, D y RAMÍREZ, J. Variación temporal de la condición trófica del lago del Parque Norte, Medellín (Antioquia), Colombia. Acta Biológica. 2010. Vol. 32, no. 92. p. 76.

Odum considera que “la eutrofización de un sistema lo retrocede, en términos de la sucesión, a un estado inicial de florecimiento súbito de algas y macrófitas, produciendo el deterioro de la calidad del agua”³².

Si bien la eutrofización es parte de un proceso natural de envejecimiento de los lagos, de forma lenta e independiente de la actividad del hombre, la creciente urbanización, el desarrollo agrícola y energético, aceleran este proceso, acortando la vida útil del cuerpo de agua³³.

El índice de estado trófico:

Es un sistema de clasificación diseñado para evaluar la condición de lagos, presas y reservorios. El sistema está basado en la cantidad de productividad biológica que tiene lugar en un cuerpo de agua. Usando este índice, es posible tener una idea rápida de qué tan productivo es un lago a través de un número IET asignado de 0 a 100, es posible establecer el estado de salud de un cuerpo de agua a través de la determinación de tres parámetros: la concentración de la clorofila-*a*, la transparencia medida con el disco de Secchi (DS) y el contenido de nutrientes. El IET puede definirse como el peso total de la biomasa en un cuerpo de agua en una localidad y tiempo específicos. Este índice fue propuesto por Carlson en 1977³⁴.

No obstante, el problema no es fácil de resolver, ya que algunos lagos pueden ser considerados eutróficos por un criterio y oligotróficos por otro. En consecuencia, la evaluación del estado trófico debe ser abordada, bajo diferentes puntos de vista:

A través de concentraciones absolutas de variables físicas, químicas y biológicas y de índices que utilizan estas variables en un cálculo matemático que ofrece un número comparativo que proporciona un lenguaje imparcial común. Una visión numérica del problema permitirá esbozar más claramente la condición trófica y su variabilidad en un ecosistema cualquiera³⁵.

2.5 FITOPLANCTON

³² ODUM, E. Ecología. Teoría de los sistemas ecológicos. Citado por MORENO, D., RAMÍREZ, J. Op. cit. p. 76.

³³ BONANSEA, M, *et al.* Concentración de clorofila-*a* y límite de zona fótica en el embalse. Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2. En: Ambiente y agua. 2012. Vol. 7, no. 3. p. 63.

³⁴ AGUIRRE, R. Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos *in-situ*. En: Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 2015. No. 86. p.19.

³⁵ NOGUEIRA, N., RAMÍREZ J. Variação mensal da condição trófica do Lago das Garças. Citado por, MORENO, D y RAMÍREZ. Op. cit. p. 77.

Se define como una comunidad de organismos fotosintéticos que vive en la columna de aguas abiertas, ya sean continentales u oceánicas. Es un importante productor primario de carbono orgánico en la mayoría de ecosistemas acuáticos. Los factores ambientales que determinan el crecimiento del fitoplancton, son; la disponibilidad de nutrientes, luz, viento herbivoría y la competencia³⁶.

2.6 CLOROFILA-a

Los pigmentos fotosintéticos son las sustancias capaces de captar energía lumínica y de transformarla en energía química mediante la fotosíntesis. La captación de energía para la función fotosintética no es la única función de los pigmentos fotosintéticos en las plantas. La gran variedad de sustancias que responden al concepto de pigmentos se diferencia en su biogénesis, en su composición y estructura molecular, diferencias que son la causa de sus distintas propiedades³⁷.

La clorofila-a es el principal pigmento fotosintético y está presente en todas las algas y cianobacterias. El contenido de clorofila-a es un buen descriptor para la bioproducción y puede relacionarse linealmente con la biomasa como una función de la composición de especies, la adaptación de la luz, la edad de una comunidad de algas y el suministro de nutrientes de las células³⁸.

Según Pinto *et al*, la clorofila-a también es un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton³⁹.

2.7 TELEDETECCIÓN

La teledetección es una técnica que permite obtener información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de datos de imágenes adquiridas por equipos que no están en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. La teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre o marina y la atmósfera desde sensores instalados

³⁶ REYNOLDS, C. The Ecology of Phytoplankton. Cambridge University press. Ed. 1. 2006. p. 5-37.

³⁷ MANRIQUE. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. En: Ecosistemas. Enero – abril, 2003. Vol. 12. no. 1. p 1.

³⁸ GREGOR, J and MARSÁLEK, B. Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and *in-situ* Methods. Citado por RIVERA. *et al*. Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. En: Acta Biológica Colombiana. 2005, vol. 10. no. 2. p. 96.

³⁹ PINTO A, VON., SPERLING, E., MOREIRA, R. Chlorophyll-a Determination Via Continuous Measurement of Plankton Fluorescence. Methodology Development. Citado por RIVERA, *et al*. Op. cit. p. 96.

en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos u objetos emiten radiación electromagnética. La cantidad y tipo de radiación que emiten depende básicamente de su temperatura⁴⁰.

Para entender el significado e importancia de la teledetección se requiere aclarar términos como: espectro electromagnético, sensores espaciales, firma espectral, reflectancia e imágenes satelitales, descritos a continuación:

El espectro electromagnético es un continuo de energía, de longitudes de onda que varían desde nanómetros hasta metros. Todos los cuerpos emiten energía electromagnética de tal manera que la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de onda a medida que la temperatura del cuerpo aumenta. Cuando la energía electromagnética entra en contacto con la atmósfera terrestre sufre una serie de alteraciones, debido a la interacción con gases, aerosoles atmosféricos: la dirección e intensidad de la radiación, la longitud y frecuencia de onda, y la distribución espectral de la energía radiante. Los procesos que provocan estas alteraciones corresponden a la dispersión, la absorción y la refracción. Es necesario conocer la forma en que estos procesos ocurren para poder diseñar y seleccionar los sensores y los filtros que permitan obtener la información útil⁴¹.

La dispersión o cambio de la dirección original de los rayos solares, es la resultante de múltiples interacciones entre la radiación incidente y los gases y partículas atmosféricas. La absorción ocurre cuando una parte de la energía incidente sobre una partícula es retenida para ser transformada generalmente en calor, después de lo cual, es re-emitida en longitudes de onda mayores. Como consecuencia de la absorción selectiva de longitudes de onda, la atmósfera presenta una serie de zonas espectrales en las que tiene un comportamiento transparente a la radiación electromagnética. Estas zonas son llamadas ventanas atmosféricas y es a través de ellas por las que es posible la teledetección de la superficie terrestre⁴².

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre (energía incidente, ϕ_i) puede descomponerse, ya sea reflejada (ϕ_r), absorbida (ϕ_a) o transmitida (ϕ_t), como se expresa en la siguiente ecuación⁴³:

⁴⁰ INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. 2007. Cap. 2. p.5.

⁴¹ HERNÁNDEZ, J. procesamiento digital de imágenes, actualización del capítulo "Percepción Remota" publicado en el libro "Manejo y Conservación de Recursos Forestales" en 2007. Santiago de Chile. 2011. p.4.

⁴² Ibid., p. 5.

⁴³ CHUVIECO, E. Op. cit. p. 51-52.

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (\text{Ecuación 1})$$

O se expresa en unidades relativas, es decir que las sumas de la reflectividad, absorptividad y transmisividad ha de ser igual a la unidad. La relación entre magnitudes no es constante, sino que varía con la longitud de onda (ecuación 2)⁴⁴.

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Todo objeto de la superficie terrestre refleja o emite energía electromagnética (EEM) según una función que depende de la longitud de onda. De ese modo, cada material u objeto tiene un comportamiento espectral que le es característico, llamado firma. Si se dispone de un sensor capaz de captar y medir la energía procedente de los objetos, cada uno de ellos aparecerá en la pantalla o imagen con su firma correspondiente, con un valor que será, solo suyo, para cada longitud de onda registrada por el sensor. De este modo se puede contar con datos espectrales numéricos, que irán trazando una curva en función de la longitud de onda y que será específica de cada material de la superficie terrestre⁴⁵.

Los sensores son instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (Radiación reflejada o emitida) que llega de la tierra y la atmósfera, esta señal se convierte en una magnitud física que puede ser tratada y grabada (en formato análogo como fotografía o digital como imagen). Para llevar a cabo la observación del terreno, los sensores son instalados en plataformas, fijas o móviles. Las características de la imagen registrada dependen en gran medida del tipo de sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición de datos⁴⁶.

Los sensores se pueden clasificar dependiendo del origen de la señal captada. Los sensores pasivos se basan en la detección de las características reflectantes del sistema observado, es decir el sensor cumple la función de registrar la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Los métodos activos son aquellos en los que el sensor cumple una doble función ya que actúa activamente produciendo una onda electromagnética de características conocidas que posteriormente registrara después de interactuar con el sistema observado. La información obtenida procede de la comparación entre la señal emitida y la señal reflejada⁴⁷.

⁴⁴ Ibid., p. 51-52.

⁴⁵ SORIA, M y MATAR, M. Nociones sobre teledetección. Disponible en internet: <<http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-cátedra-para-Cartografía-Aplicada.pdf>>. 2016. p. 20.

⁴⁶ INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Op. cit. p. 6.

⁴⁷ Ibid., p. 6.

Una imagen satelital es una matriz digital de puntos, capturado por un sensor a bordo de un satélite y que orbita alrededor de la tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita, barre la superficie de la tierra con un conjunto de detectores que registran la energía reflejada. La teledetección hace uso de las imágenes de satélite como insumo de datos para extraer información del medio geofísico y geográfico. Estas se encuentran es formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles, en donde cada pixel tiene un valor digital o de reflectancia⁴⁸.

2.8 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA EN EL ESPECTRO ÓPTICO

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absorbitividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en las bandas del espectro electromagnético: azul y verde, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio donde ya es prácticamente nula. La variabilidad del agua se detecta mejor en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que debe ser relacionada con la profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y rugosidad de la superficie⁴⁹.

La reflectancia incluye, por lo tanto, la de la superficie de agua, la de los materiales existentes en el fondo y de los mismos suspendidos en el cuerpo de agua. Las características de absorción y transmisión no son sólo función de las propiedades el agua sino, además, de la influencia de los tipos y formas de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos⁵⁰.

⁴⁸ MARTÍNEZ, J. y DÍAZ, A. Fundamentos de Teledetección Espacial. Comisión Nacional del Agua. 2005. Disponible en internet: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>. p.13.

⁴⁹ CHUVIECO. Op. cit. p. 62.

⁵⁰ Ibid., p. 62.

3. METODOLOGÍA

3.1 ÁREAS DE ESTUDIO

3.1.1 Caso 1: Ciénaga de Ayapel. El sistema cenagoso de Ayapel se ubica en la jurisdicción del municipio de Ayapel, en el departamento de Córdoba, en la planicie atlántica del norte de Colombia (Figura 1). Forma parte del macrosistema de humedales y zonas anegables de la depresión Momposina⁵¹ y es la más grande del plano de inundación del río San Jorge⁵². El territorio se ubica en una zona de bosque húmedo tropical, con época de lluvias de abril a noviembre y época seca de diciembre a marzo. La precipitación anual fluctúa entre 2.000 y 2.500 mm y la temperatura ambiente alcanza valores mayores a 25 °C⁵³.

Esta ciénaga se encuentra a 20 msnm, es un ambiente léntico pulsátil y poco profundo con valores medios cercanos a los 6 m. Tiene extensión aproximada de 45 km² a 120 km² y posee una red de drenaje que recoge las aguas de las quebradas: Quebradona, Escobilla, Caño Trejos, Caño Muñoz y Caño Don Matías (vertientes oriental y sur). El sistema entrega sus excedentes al río San Jorge por los caños Grande y Viloría. Los caños y quebradas, especialmente de las vertientes orientales y suroriental, son de baja velocidad y permiten la conexión de sus aguas con la de otros caños y ciénagas menores en los periodos de alta precipitación⁵⁴.

Presenta fluctuaciones importantes en el nivel del agua lo que promueve variaciones de las condiciones limnológicas y morfológicas del cuerpo de agua. Dentro del comportamiento pulsante, notablemente regular en su patrón básico (Figura 2), pero con ciertas variaciones: en el itinerario, tasas de cambio y en la amplitud/intensidad; lo que depende de los patrones climáticos de las cuencas de los ríos aportantes. Los momentos considerados incluyen: aguas altas (agosto, septiembre, octubre), aguas bajas o estiaje (marzo, abril, mayo)

⁵¹ MONTOYA, Yimmy y AGUIRRE, Néstor. Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (Ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. En: Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Septiembre, 2010, no. 55. p. 78.

⁵² JIMÉNEZ. Luz., CARVAJAL, Juan., AGUIRRE, Néstor. Las ciénagas como hábitat para los peces: estudio de caso en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. En: Acta Biológica. 2010, vol. 32, no. 92. p. 54.

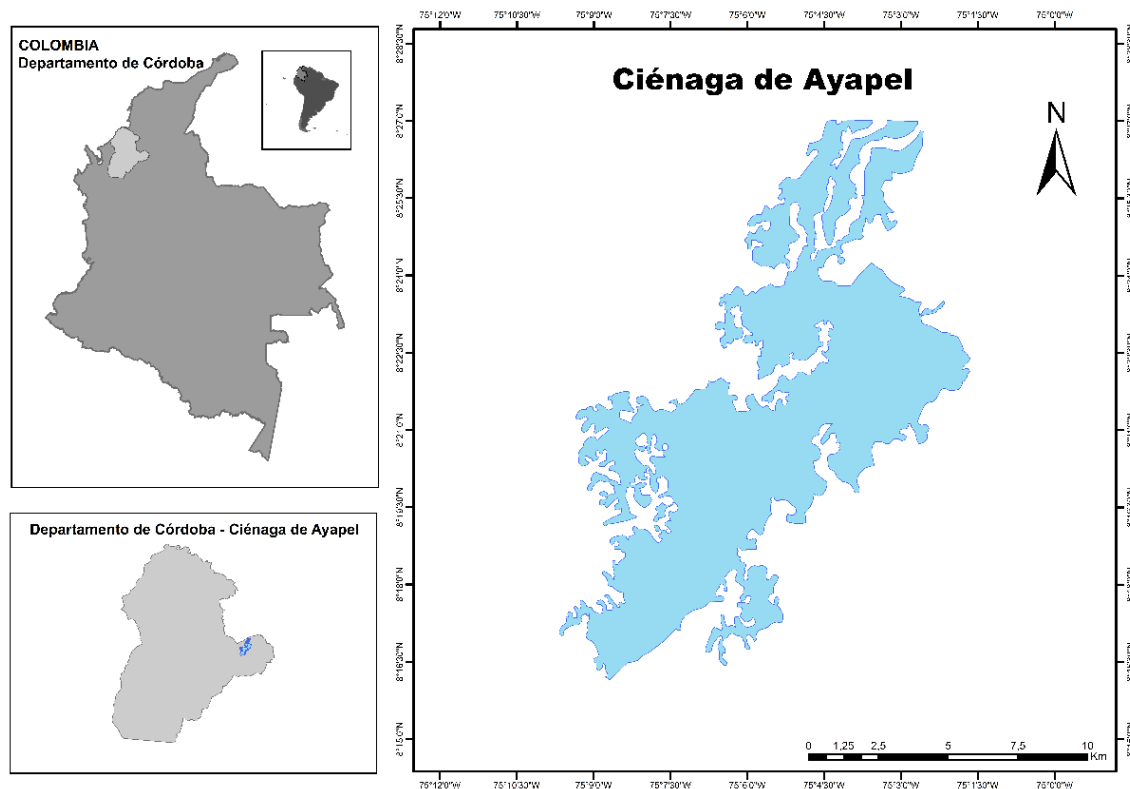
⁵³ AGUIRRE, N, *et al.* Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia. 2005. Citado por: HERNÁNDEZ, Esnedy, *et al.* Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. En: Acta Biológica. 2008, vol. 30, no. 88. p. 68-69.

⁵⁴ RESTREPO, C. Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la Ciénaga de Ayapel Tesis maestría en Recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. 2005. Citado por: JIMÉNEZ, Luz, *et al.* Op. cit. p. 54.

y periodos de transición: aguas altas en descenso (noviembre, diciembre, enero, febrero) y aguas bajas en ascenso (mayo, junio, julio).

La ciénaga de Ayapel es importante ya que regula el régimen hidrológico de las áreas tributarias de los ríos San Jorge y Cauca, de varios caños y quebradas que vierten sus caudales sobre ella. Alberga gran variedad de especies de flora y fauna, característica que genera belleza paisajística, brinda refugio, alimento y protección a especies migratorias de peces. Sin embargo, se deteriora a causa de la deforestación, degradación de suelos, contaminación del agua, manejo inadecuado de los recursos naturales y prácticas culturales para acondicionar las áreas inundables para agricultura⁵⁵.

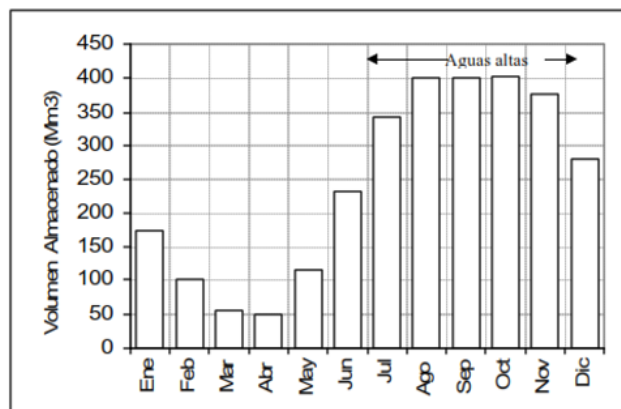
Figura 1. Localización geográfica de la Ciénaga de Ayapel, departamento Córdoba-Colombia.



Fuente: Autor.

⁵⁵ AGUILERA, María. Ciénaga de Ayapel: Riqueza en biodiversidad y recursos hídricos. Documentos de trabajo sobre economía regional. Banco de la República. Cartagena de Indias. 2009, no. 112. p. 12.

Figura 2. Patrón típico de variación de volúmenes almacenados en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Grupo de investigación en Gestión y Modelación Ambiental, Corporación autónoma regional de los valles del Sinú y del San Jorge⁵⁶

3.1.2 Caso 2: Lago de Tota. Se encuentra ubicado al oriente del departamento de Boyacá, en una elevada depresión de la cordillera oriental de los Andes Colombianos a 3015 msnm (Figura 3). Las cuencas hidrográficas que surten al lago se encuentran en los municipios de Aquitania, Tota y Cuítiva. (5° 28' 13" N – 5° 39' 14" N y 72° 50' 38" W – 73° 00' 00" W)⁵⁷. Dividido en dos sectores (lago Chico y lago Grande), es el cuerpo de agua con mayor extensión del país y el segundo en Suramérica⁵⁸. La profundidad media es de 30 m, la máxima de 62 m, perímetro de 47 Km, volumen máximo $1.920 \times 10^6 \text{ m}^3$ y ocupa 60 Km²⁵⁹.

Es un sistema polimíctico cálido, posee aguas poco mineralizadas y pH con una ligera tendencia a la basicidad. La relación N: P es baja, lo cual es típico en lagos tropicales altoandinos, se considera un sistema oligotrófico⁶⁰. El lago está afectado por dos regímenes pluviales: el efecto interandino bimodal en la

⁵⁶ GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN Y MODELACIÓN AMBIENTAL, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL SINÚ Y DEL SAN JORGE. Plan de manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel. Medellín. Universidad de Antioquia. Junio, 2007. p. 75.

⁵⁷ NÚÑEZ, L, *et al.* Informe de batimetría Lago de Tota. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá. Diciembre, 2014. p. 5.

⁵⁸ PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Lago de Tota, POMCA, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Bogotá. 2005. p. 3.

⁵⁹ ARMADA NACIONAL. Informe final levantamiento topográfico, batimétrico y sedimentológico Laguna de Tota. Centro de Investigaciones Oceanográfico. Cartagena de Indias. 1998. Citado por: GONZÁLEZ, A., ARANGUREN, N., GAVIRIA, S. Cambios en la estructura de la población de *Boeckella gracilis* (Crustacea, Centropagidae) en el plancton del Lago de Tota, Boyacá, Colombia. *En: Acta biológica*. 2008, vol. 13. no. 2. p. 63.

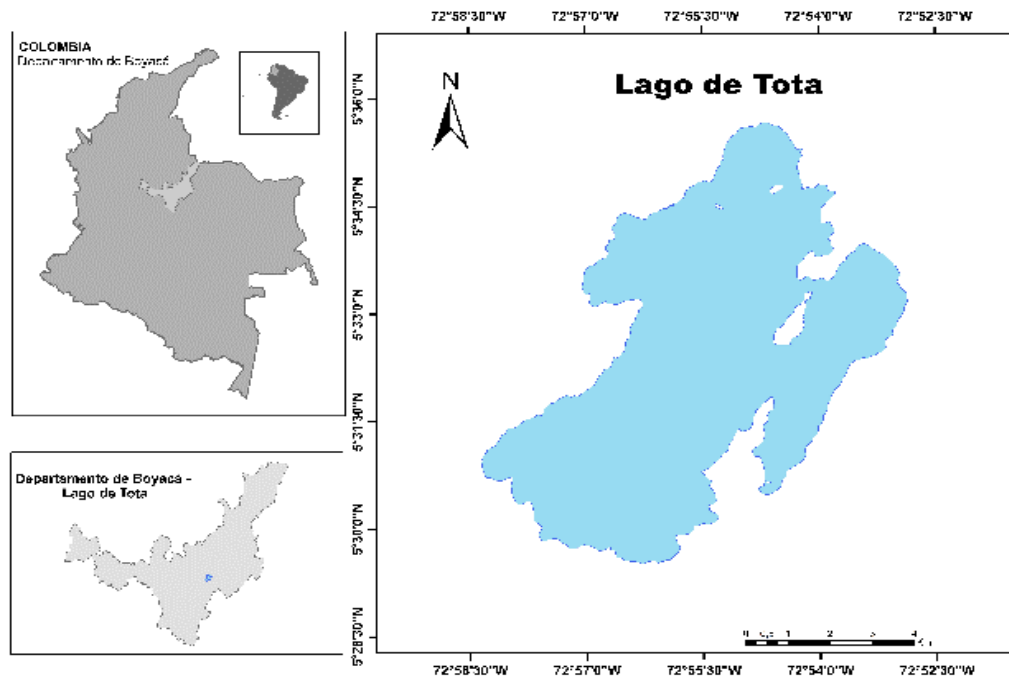
⁶⁰ CARDOZO, A y PITA, S. Estudio de la estructura cualitativa y cuantitativa de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Tota. Sector Lago Chico (Aquitania-Boyacá), tesis de pregrado. Citado por: GONZÁLEZ, A., ARANGUREN, J., GAVIRIA, S. Op. cit. p. 63.

cuenca occidental (730 mm/año) y el monomodal predominante en la región nororiental (945 mm/año) influenciado por los llanos orientales, con una estación lluviosa de abril a noviembre y seca de diciembre a marzo⁶¹.

Las entradas de agua al Lago provienen principalmente de las cuencas de los ríos: Olarte (2,08 m³/s), Tobal (1,59 m³/s), Hato Laguna (0,58 m³/s), Los Pozos (0,25 m³/s) y La Mugre (0,12 m³/s)⁶².

Este sistema es reserva del 13,55% del agua nacional y es una de las principales cuencas hidrográficas en la región; constituye un valor ambiental y económico a nivel regional y nacional, pues representa el abastecimiento de agua para consumo humano de 250.000 habitantes, 20% del total de la población de Boyacá. Sin embargo, el lago ha sido afectado por diferentes acciones antrópicas, que implican el desarrollo de actividades productivas como el cultivo de cebolla y la explotación piscícola⁶³, además el municipio de Aquitania vierte las aguas residuales sin tratamiento directamente⁶⁴.

Figura 3. Localización geográfica del Lago de Tota, departamento Boyacá- Colombia.



Fuente: Autor.

⁶¹ GONZÁLEZ, A., ARANGUREN, N., GAVIRIA, S. Op. cit. p. 63.

⁶² CONPES. Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota. Consejo Nacional de Política Económica y Social, 3801. Bogotá. 2014. p. 10.

⁶³ Ibid., p. 11.

⁶⁴ PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Op. cit. p. 3.

3.2 BÚSQUEDA DE REGISTROS DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA- α .

Se recopiló información en bases de datos relacionada con trabajos de investigación y publicaciones realizados en las áreas de estudio, lo anterior con el fin de obtener registros de concentración de clorofila-a.

3.2.1 Caso 1. Para la fase de campo de la Ciénaga de Ayapel se consideró el trabajo de investigación: “Diagnóstico ambiental de la ciénaga de Ayapel a través de la variación temporal de los aspectos morfo funcionales del fitoplancton y un indicador de calidad ecológica”⁶⁵. Se tomaron muestras integradas de agua en la superficie, a la altura de la profundidad Secchi (1DS) y a tres veces dicha profundidad (3DS), (con botella tipo Kemmerer), depositadas en frascos plásticos (un litro), se midieron algunas variables físicas y químicas como: oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica y transparencia Secchi⁶⁶, estos datos se registraron en ocho estaciones de muestreo (Figura 4), tomados durante el año 2015, para los meses: mayo, septiembre, octubre y diciembre. Este año fue influenciado por el fenómeno de variabilidad climática El Niño – Oscilación del Sur- ENOS⁶⁷.

Además, el autor aportó información adicional acerca de registros de clorofila-a, de que no se incluían dentro de los resultados del trabajo. La cuantificación de clorofila-a se realizó mediante la técnica de fluorometría, siguiendo la metodología propuesta por Welschmeyer, que consiste en el uso de un fluorómetro con filtros de excitación (340-500 nm) y un filtro de emisión de 680 nm. Este proceso se sustenta en que el proceso fotosintético se inicia cuando la luz es absorbida por los pigmentos (clorofila *a*, *b* y carotenoide), parte de dicha energía es disipada principalmente como calor y en menor grado re-emitida como energía luminosa (fluorescencia)⁶⁸.

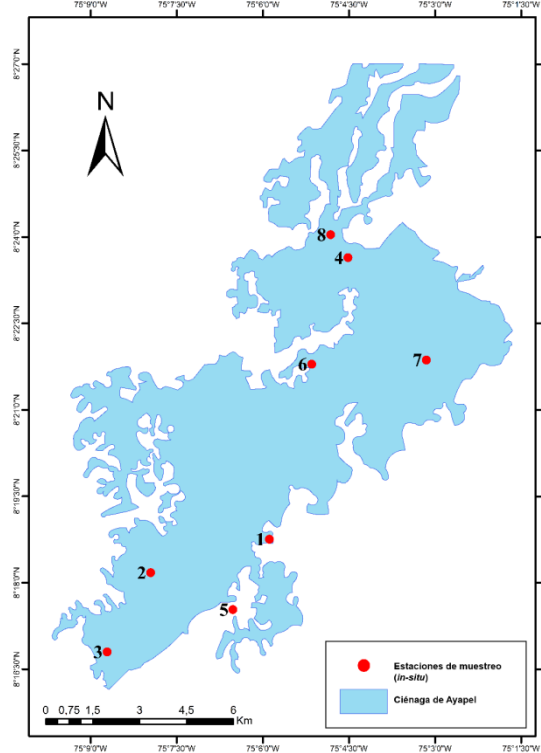
⁶⁵ ZABALA, Ana. Diagnóstico ambiental de la Ciénaga de Ayapel a través de la variación temporal de los aspectos morfo funcionales del fitoplancton y un indicador de calidad ecológica. Tesis de maestría. Medellín. Universidad de Antioquia. 2016. 104 p.

⁶⁶ Ibid., p. 24.

⁶⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Disponible en: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos-alertas/fenomenos-el-nino-y-la-nina/-/document_library_display/8joWMReTv53x/view/397201>.

⁶⁸ MAXWEEL, K and GILES, J. Chlorophyll fluorescence, a practical guide. *En: Journal experimental Botany*. 2002, vol. 51, no. 60. p. 345.

Figura 4. Ubicación espacial de las estaciones de muestreo en la ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

3.2.2 Caso 2. Para el caso del Lago de Tota, existen investigaciones que reportan valores de concentración de clorofila-*a*. Cardozo y Pita (2004)⁶⁹ y Bermúdez y Moreno (2002)⁷⁰, incluyen dos medidas *in-situ* de la zona limnética de Lago Chico y Lago Grande; cantidad de datos que no es suficiente para hacer un análisis confiable. Además, los informes ^{71,72}, tienen en cuenta registros en 10 estaciones distribuidas espacialmente, correspondientes a 8 fechas de muestreo: septiembre, octubre y noviembre de 2014; julio (13 y 24), agosto y septiembre de 2015; fechas que no se encuentran cercanas a la información satelital disponible.

Dado lo anterior, fue necesario obtener nuevos datos *in-situ* en una fase de campo desarrollada en enero de 2018 (periodo seco). Así, la condición climática permite que los satélites registren imágenes con menor nubosidad.

⁶⁹ CARDOZO, A y PITA, S. Op. cit.

⁷⁰ BERMÚDEZ y MORENO. Estudio de la comunidad fitoplanctónica en el Lago de Tota. Trabajo de grado pregrado. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Básicas. Tunja. 2002.

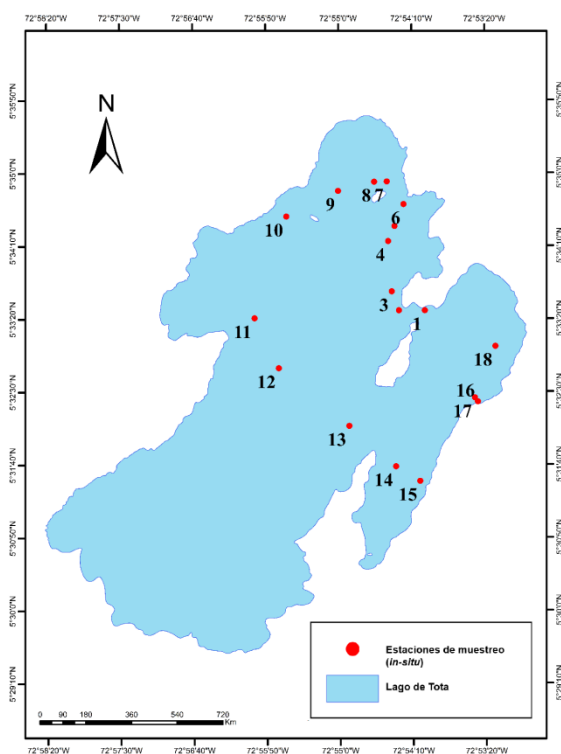
⁷¹ UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Efecto de variabilidad climática de un ciclo anual sobre el flujo de nutrientes (C, N y P), fuentes y biocaptación en el Lago de Tota. Convenio 092. 2015. 58 p.

⁷² UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Flujo de nutrientes (C, N y P) en el Lago de Tota: análisis de fuentes y biocaptación. Convenio 012. 2014. 49 p.

La fecha del muestreo estuvo condicionada a la programación del satélite para cubrir la zona de interés según la resolución temporal de Landsat-8 (16 días).

Con una botella tipo Van Dorn se tomaron muestras de agua de un litro en 18 estaciones (Figura 5), colectadas de 09:00 am a 11:00 am, a una profundidad intermedia (1.5 m) entre la superficie y la profundidad de Secchi, “debido a que esta región contribuye hasta en un 90% de la radiación ascendente”⁷³. Para cada estación se realizaron mediciones *in-situ* de conductividad, pH y transparencia Secchi.

Figura 5. Ubicación espacial de las estaciones de muestreo en el Lago de Tota.



Fuente: Autor.

Las muestras fueron procesadas en el laboratorio, de acuerdo al Manual de Prácticas de Limnología de la Universidad Nacional⁷⁴, con el siguiente protocolo:

⁷³ KIRK, J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Ed. 2. Cambridge University Press, Cambridge. 1994. Citado por: DE MORALES, E, *et al.* Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *En: Limnology*. 2006, vol. 7. p. 155.

⁷⁴ PINILLA, G. Prácticas de Limnología. Guías de laboratorio y campo. Universidad Nacional de Colombia, Ecología y Medio Ambiente. 2017.

- Se filtraron 600 ml de cada muestra a través de un filtro de fibra de vidrio Gf/F con tamaño de poro de 47mm.
- Los filtros fueron almacenados en un congelador a 10°C durante 40 horas.
- En un lugar oscuro se maceraron los filtros con ayuda de un mortero, se agregaron 5 ml de acetona al 10%, hasta obtener una masilla, que fue transferida a un tubo Falcon aislado de la luz por una película de aluminio, esta macilla fue lavada con acetona hasta completar 10 ml.
- Las muestras fueron almacenadas 2 horas, posteriormente se centrifugaron a 3000 rpm durante 5 minutos.
- Se tomaron 3 ml del sobrenadante de la muestra en la cubeta del espectrofotómetro (calibrado al 100% de absorbancia con un blanco de acetona al 10%), se realizaron las lecturas de absorbancia para las longitudes de onda: 664 nm (Clorofila-a) y 750 nm (turbidez).
- Con las lecturas de reflectancia se aplicó la ecuación (3) para la obtención de concentración de clorofila.

$$Cl - \alpha (mg / m^3) = 11,86 * (DO664) * \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde:

DO664 = Absorbancia medida a 664 menos la absorbancia medida a 750

V₁ = Volumen del extracto en litros

V₂ = Volumen de agua filtrada en m³

3.3 INFORMACIÓN SATELITAL

La búsqueda de imágenes de satélite se realizó en la plataforma USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para satélites que cumplieron con los siguientes criterios:

- Satélite con sensibilidad multiespectral
- Disponibilidad para la ubicación geográfica
- Baja nubosidad sobre el cuerpo de agua (inferior al 10%).
- Fecha de adquisición de la imagen (lo más cercana posible a la toma de datos *in-situ*).

3.4 CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE.

El satélite Landsat 8 Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI_TIRS) fue seleccionado para el desarrollo del presente trabajo, según las características

nombradas anteriormente. Las imágenes satelitales disponibles datan de marzo de 2013 a la actualidad, resolución espacial de 30 metros, excepto la pancromática (15m) y las bandas del sensor termal infrarrojo (100m), resolución espacial de 16 días, resolución radiométrica de 16 bits, resolución espectral de 11 bandas (tabla 1), formato GeoTIFF y sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM)⁷⁵.

Además, Landsat 8 cuenta con un código de reflectancia superficial (LaSRC o SR), el cual genera imágenes con correcciones atmosféricas, mediante la aplicación de algoritmos que eliminan errores causados por la intervención de gases, aerosoles y moléculas, en la dispersión o absorción de la radiación electromagnética. Los archivos están nombrados con el ID "_sr_" seguido de la designación de cada banda. Todos los paquetes incluyen metadatos basados en el lenguaje de marcado extensible (xml). Las bandas de reflectancia de superficie se encuentran en archivos separados, con la excepción de Cloud QA Band, disponible en una única capa de bits⁷⁶.

Las imágenes corresponden al Nivel 2- Categoría T1, cuentan con calidad más alta disponible en el nivel de pre-procesamiento (adecuada para el análisis de series de tiempo)⁷⁷, en el caso de la imagen del Lago de Tota (enero 2018), la descarga se efectuó dos semanas después de que estuviera disponible en la plataforma, ya que inicialmente los datos se encuentran en la categoría "tiempo real" (RT) que no cuentan con el procesamiento geométrico y radiométrico finalizado. Adicionalmente se seleccionó la calidad para la combinación OLI_TIRS con valor de 9, los valores se encuentran en el rango (-1, 0, 9) en donde 9 es el mejor⁷⁸.

⁷⁵ U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8 surface reflectance code (LASRC) product, product guide. Versión 4.2. December, 2017. 39 p.

⁷⁶ Ibid., 39 p.

⁷⁷ Ibid., p. 13.

⁷⁸ U.S GEOLOGICAL SURVEY. (s.f.). Información general. [En Línea]. Disponible en internet: <https://lta.cr.usgs.gov/Landsat_8_C1.html#landsat_product_id>.

Tabla 1. Rangos espectrales del sensor Landsat 8 (OLI_TIRS)

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Costera - Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
8	Pancromática	0.503 - 0.676	15
9	Cirrus	1.363 - 1.384	30
10	(TIR 1)	10.60 - 11.19	100
11	(TIR 2)	11.50 - 12.51	100

Fuente: USGS⁷⁹.

3.5 IMÁGENES SELECCIONADAS

Como criterio adicional a lo establecido en el numeral 3.3, y con el fin de realizar la comparación temporal de la concentración de clorofila-a, se incluyó la característica hidrológica presente en cada área de estudio (Tabla 2). Para el caso particular de la Ciénaga de Ayapel se tuvo en cuenta el área de inundación de la ciénaga, el patrón típico de variación del volumen almacenado y la fase del pulso de inundación.

La hora de la toma de las imágenes se extrajo de la metadata, y corresponden a: 15:06 y 15:17 para el Lago de Tota y la Ciénaga de Ayapel respectivamente.

Tabla 2. Listado de imágenes seleccionadas para cada sistema acuático, agrupadas según la característica hidrológica.

Sistema acuático	Fecha imagen satelital	Característica hidrológica	Fecha fase de campo
Ciénaga Ayapel	19 de julio 2014	Aguas bajas en ascenso	Septiembre de 2015
	8 de septiembre 2015		
	24 de enero 2014		
	29 de marzo 2014	Aguas altas en descenso	
	29 de diciembre 2015		
	16 de enero 2017		
	21 de mayo 2016	Aguas bajas	
	6 de abril 2017		
Lago de Tota	29 de enero 2015	Periodo seco	22 de enero 2018
	16 de enero 2016		
	2 de enero 2017		
	21 de enero 2018		

⁷⁹ U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Disponible en internet: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>.

Fuente: Autor.

3.6 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.

Fue realizado con el software ERDAS Imagine 2010 (licencia académica), para cada imagen antes descrita, así:

3.6.1 Correcciones geométricas. La corrección geométrica de una imagen (ortorrectificación), “incluye cualquier cambio de posición de los píxeles que la conforman, para eliminar la anomalía de la localización detectada en la imagen. La corrección geométrica de imágenes puede abordarse a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control, en este caso el error se estima individualmente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen”⁸⁰.

Las imágenes de Landsat-8, proporcionan datos radiométricamente calibrados y geolocalizados con píxeles alineados geográficamente para soportar el análisis de series de tiempo⁸¹. Para este caso la cantidad de puntos de control utilizados para la verificación del terreno fue de 140 a 277 y 4 puntos de control de tierra utilizados en la verificación del producto corregido del terreno, datos extraídos de la metadata de cada imagen.

3.6.2 Recorte de la ventana de trabajo. Para cada área de estudio se realizó el recorte del área de interés, a partir de shapefiles de referencia (polígonos) generados con cartografía básica 1:500.000 del servicio web del Instituto Geográfico Agustín Codazzi⁸². Por lo cual, se solapó el polígono de referencia con las imágenes de satélite, y se utilizó la herramienta de *Raster/Subset & chip/Create subset image*, para extraer el raster final (Figuras 6, 7).

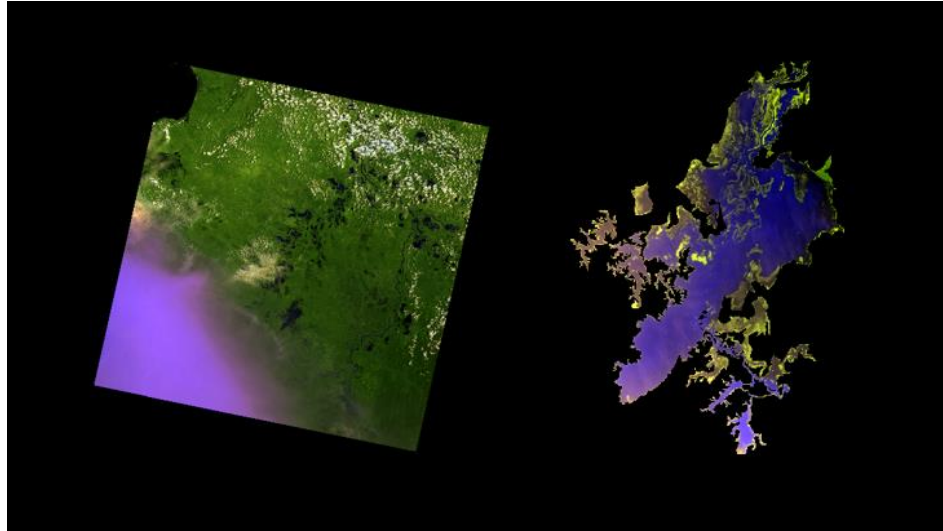
Para el caso de la Ciénaga de Ayapel, se realizaron modificaciones del contorno del shapefile, según la variación del espejo de agua en cada periodo hidrológico (contracción o expansión), usando herramienta *Reshape Feature Tool* del software ArcGis 10.3.1 (licencia académica).

⁸⁰ CHUVIECO. Op. cit. p. 292.

⁸¹ Usgs. https://lta.cr.usgs.gov/Landsat_8_C1.html#collection_category

⁸² Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Cartografía base de Colombia. Escala 1:500.000. Disponible en: <ftp://cartobase@cartografialibre.igac.gov.co>

Figura 6. Recorte de la imagen Landsat-8 (enero2018). Izquierda imagen completa, derecha área seleccionada a partir del polígono de referencia de la Ciénaga de Ayapel para el periodo de aguas en descenso (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).



Fuente: Autor

Figura 7. Recorte de la imagen Landsat-8 (enero2018). Izquierda imagen completa, derecha área seleccionada a partir del polígono de referencia del Lago de Tota, (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).



Fuente: Autor.

3.6.3 Correcciones radiométricas. Son preprocesamientos que modifican los valores de los niveles digitales (ND) originales, con el objeto de acercarlos a los que había presentes en la imagen en caso de una recepción ideal, la

conversión de estos niveles digitales permite trabajar con variables físicas comparables en el tiempo”⁸³.

El satélite Landsat 8 (OLI_TIRS) con código superficial (LaSRC), cuenta con correcciones radiométricas previas, los valores de resolución radiométrica de las imágenes, contienen información de 16 bits, con rangos de reflectancia validos de 0 a 1000, estos fueron multiplicados por el factor 0,0001, con el fin de escalar dicha información a valores de reflectancia en un rango 0 a 1 (Tabla 3)⁸⁴.

Tabla 3. Especificaciones del sensor Landsat-8, con código de reflectancia superficial.

Designación de bandas	Banda	Unidades	Rango	Rango valido	Valor de relleno	Valor saturado	Factor de escala
sr_band1	Band 1	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sr_band2	Band 2	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sr_band3	Band 3	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
Designación de bandas	Banda	Unidades	Rango	Rango valido	Valor de relleno	Valor saturado	Factor de escala
sr_band4	Band 4	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sr_band5	Band 5	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sr_band6	Band 6	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sr_band7	Band 7	Reflectancia	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
pixel_qa	Quality Band	Bit Index	0-32768	0-32768	1 (bit 0)	NA	NA
sr_aerosol	Aerosol QA	Bit Index	0 - 255	0 - 255	NA	NA	NA

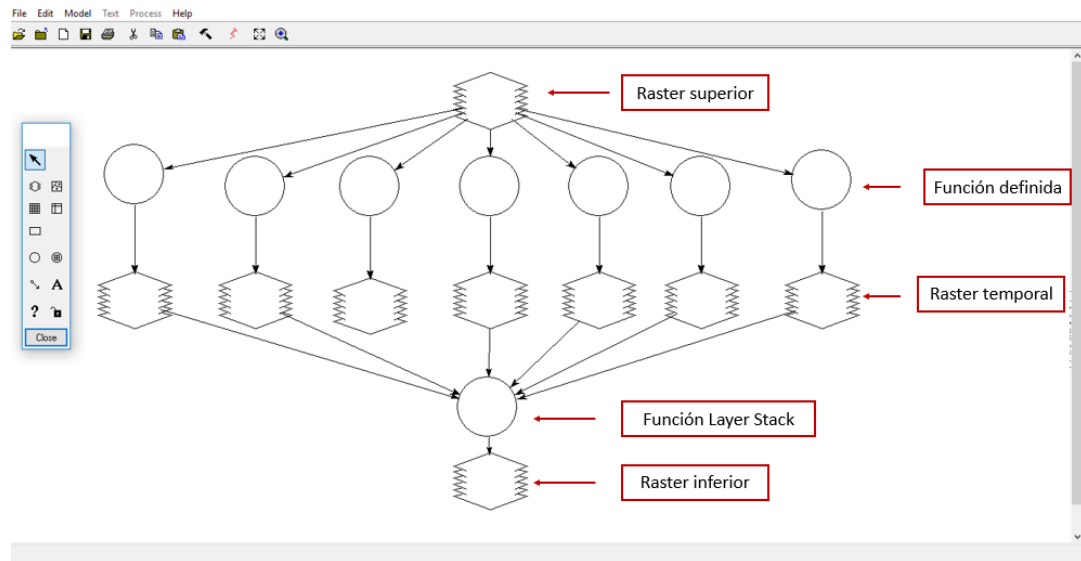
Fuente: Modificado de USGS.

A través de la herramienta “*Model Maker*” se realizó el esquema que modela la conversión de los datos de 16 bits a valores de reflectancia en el rango 0-1 (Figura 8). En el *raster superior* se incorporó la imagen (con unión de bandas); en los iconos, *definición de funciones*, se vincularon los valores reflectancia por el factor 0.0001. Los *raster temporales* integraron la conversión por bandas, la función *Layer Stack* unificó las bandas en un solo archivo, y finalmente, el *raster inferior* determinó la salida de una nueva imagen con rango de reflectancia 0 a 1 (Figuras 9 y 10).

⁸³ Ibid., p 259.

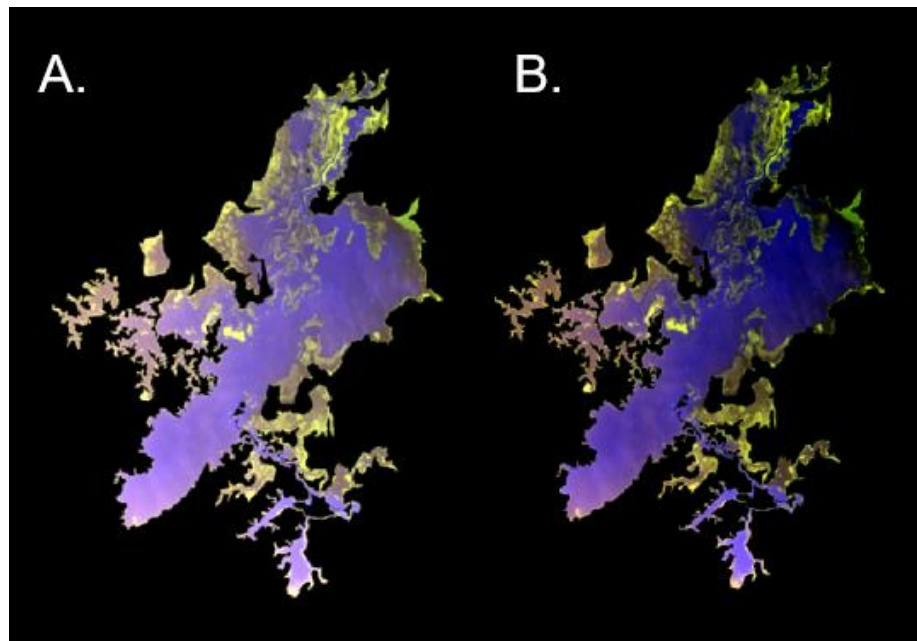
⁸⁴ U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8 surface reflectance code (LASRC) product, product guide. Op. cit. p. 20.

Figura 8. Esquema de conversión de los valores de resolución radiométrica (16 bits) a valores de reflectancia (rango 0-1).



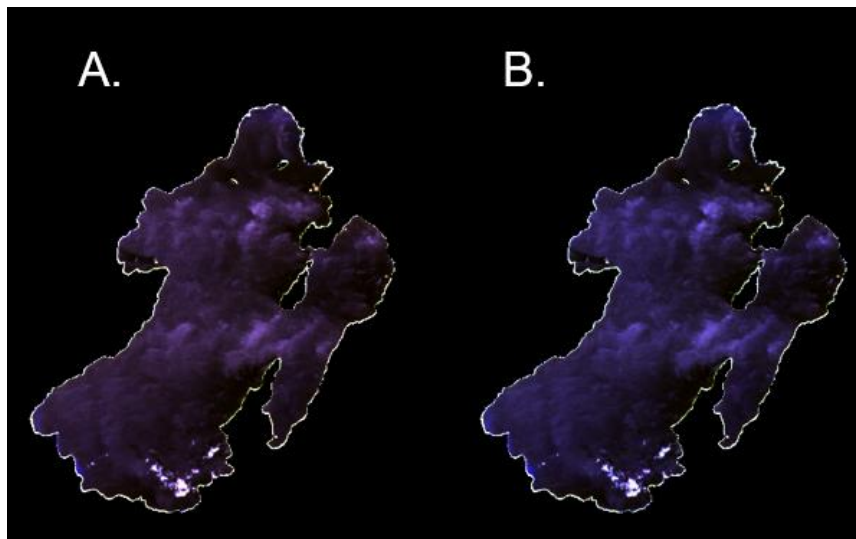
Fuente: Autor.

Figura 9. Resultado de la corrección radiométrica para la Ciénaga de Ayapel. **A.** Imagen con valores de reflectancia 1-10000; **B.** Imagen corregida (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).



Fuente: Autor.

Figura 10. Resultado de la corrección radiométrica para el lago de Tota. **A.** Imagen con valores de reflectancia 1-10000; **B.** Imagen corregida (combinación de bandas en falso color: 7,6,4).



Fuente: Autor.

3.7 CÁLCULO DE MODELOS

Para la ciénaga de Ayapel, el cálculo se realizó con la imagen del 8 de septiembre de 2015 y para el Lago de Tota con la imagen del 21 de enero de 2018 (fechas que coincidieron con el periodo de muestreo en campo). En cada una se extrajeron los valores de reflectancia para cada pixel, correspondientes a las coordenadas del punto de muestreo *in-situ*.

Para estimar la asociación entre la clorofila-*a* y los valores de reflectancia, se realizaron regresiones lineales (múltiples y simples) con la herramienta de análisis de datos de Excel, 60 para la ciénaga de Ayapel y 25 para el Lago de Tota; la clorofila-*a* se tomó como variable dependiente de los valores de reflectancia y las combinaciones de banda como variable independiente (b2, b3, b4 y b5)⁸⁵.

Con el objetivo de seleccionar la combinación de bandas con mayor asociación en cada sistema, se utilizó como parámetro estadístico el de determinación (r^2) para las regresiones simples y coeficiente de determinación ajustado (r_a^2) para las regresiones múltiples (nivel de confianza del 95%)⁸⁶.

⁸⁵ DUAN, H, *et al.* Assessment of chlorophyll-*a* concentration and trophic state for lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. En: Environmental Monitoring and Assessment. 2007, vol. 129. p. 301.

⁸⁶ DE MORALES, E, *et al.* Op. cit. p. 156.

3.8 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar la idoneidad del modelo de regresión estimado, se calcularon los valores de clorofila-*a* a partir de las reflectancias extraídas de la imagen satelital y se compararon con las concentraciones de clorofila-*a* medidas *in-situ*. Se utilizaron los parámetros estadísticos: coeficiente de determinación (r^2) y el coeficiente de variación (CV).

3.9 APLICACIÓN DEL MODELO

Después de seleccionar el modelo de regresión para cada sistema, se aplicó el modelo a las imágenes seleccionadas, (herramienta Model Maker, Figura 8), en el raster superior se incorporó la imagen con los valores de reflectancia, en el ícono de definición de funciones se aplicó la ecuación para la cuantificación de clorofila-*a* (ver resultados). Finalmente, el raster inferior determinó la salida de la imagen con valores de concentración de clorofila-*a* en mg/m^3 .

Posteriormente, se generaron salidas gráficas mediante el software ArcGis 10.3.1 (licencia académica), con los rangos de valores de concentración de clorofila-*a* definidos.

3.10 ZONIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.

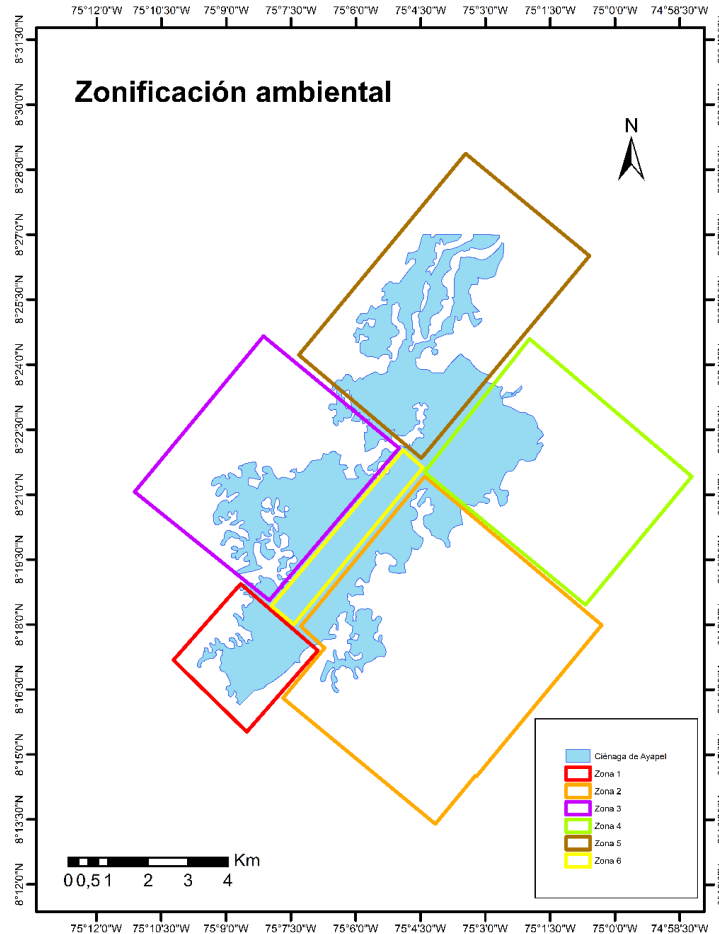
Para el análisis de variación espacio-temporal de la concentración de clorofila-*a* en las zonas de estudio, se realizó una zonificación ambiental considerando los siguientes criterios:

3.10.1 Ciénaga de Ayapel.

- **Zona 1.** Influencia de las quebradas Quebradona, Las Piedras y Escobillas, así como la ciénaga de Los Hoyos. Se caracteriza a su vez por el desarrollo intensivo y extensivo de actividades auríferas, ganaderas y agrícolas.
- **Zona 2.** Influencia de la subcuenca del Caño Barro, principal afluente de la ciénaga y de los sectores Escobillas y Escobillitas.
- **Zona 3.** Influencia de la subcuenca Ayapel. (Vertimientos de aguas residuales del municipio de Ayapel)
- **Zona 4.** Influencia del Caño Muñoz con alta carga orgánica, producto del vertimiento de aguas negras provenientes del corregimiento de Playa Blanca.
- **Zona 5.** Influencia del río San Jorge, y los caños Grande y Viloría.

- **Zona 6.** Zona limnética.

Figura 11. Zonificación de la Ciénaga de Ayapel



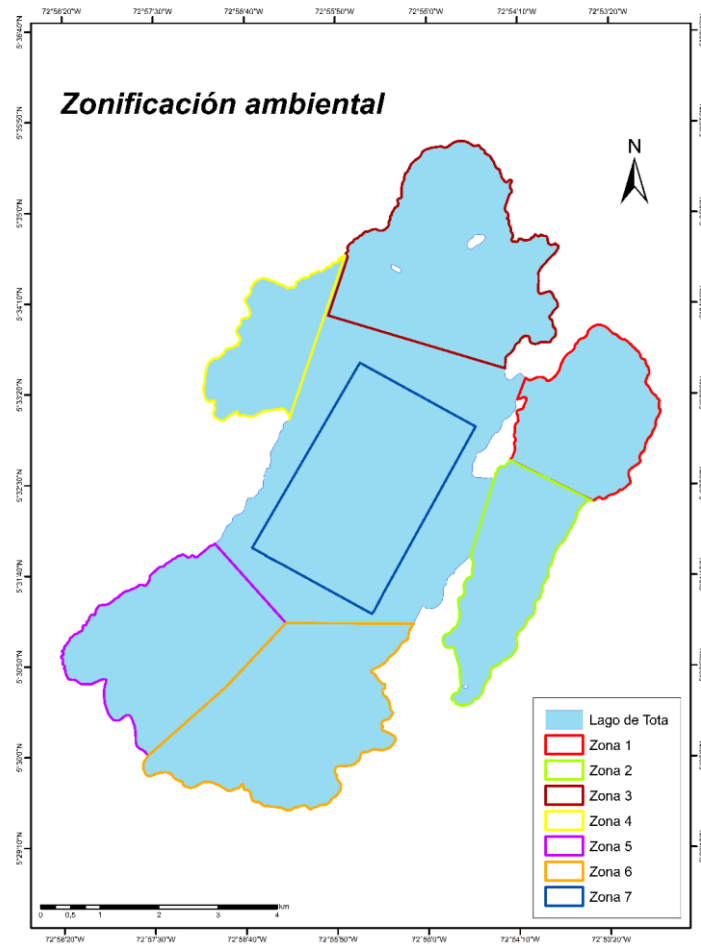
Fuente: Autor.

3.10.2 Lago de Tota.

- **Zona 1.** Lago Chico, zona norte.
- **Zona 2.** Lago Chico, zona sur, influenciada por la desembocadura de los tributarios: Tobal y La Mugre.
- **Zona 3.** Aporte del Tributario Hato Laguna, la zona presenta bajas pendientes y desarrollo de plantas acuáticas sumergidas.
- **Zona 4.** Influencia de actividad acuícola intensiva (presencia de Jaulas flotantes).

- **Zona 5.** Desarrollo turístico y vegetación acuática.
- **Zona 6.** Influencia del Río Olarte, cuya cuenca se encuentra alterada por actividad ganadera y agrícola especialmente por cultivos de papa.
- **Zona 7.** Zona limnética.

Figura 12. Zonificación del lago de Tota.



Fuente: Autor.

3.11 VALORACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO.

A partir de los valores de concentración de clorofila-a, se calculó el Índice de Estado Trófico (IET) propuesto por Carlson ⁸⁷ (ecuación 4), basado en rangos de clasificación de límites tróficos propuestos por Kratzer y Brezonick ⁸⁸ (Tabla 4); a su vez, se estimó el Índice de Carlson modificado (IETm) propuesto por Toledo y colaboradores (ecuación 5), basado en la reclasificación limnológica del estado trófico según características de los ecosistemas acuáticos tropicales (Tabla 5)⁸⁹.

$$IET (cl - a) = 10 \left(6 - \frac{2,4 - 0,68 * \ln(cl)}{\ln 2} \right) \text{ (ecuación 4)}$$

Tabla 4. Clasificación de estado trófico para el índice de Carlson (IET).

Clasificación trófica	Valor del índice
Ultraoligotrófico	<20
Oligotrófico	20-40
Mesotrófico	40-50
Eutrófico	50-60
hipereutrófico	>60

Fuente: Kratzer, C, Brezonik, P.

$$IETm (cl - a) = 10 \left(6 - \frac{2,4 - 0,695 * \ln(cl)}{\ln 2} \right) \text{ (ecuación 5)}$$

Tabla 5. Clasificación de estado trófico para el índice de Carlson modificado (IETm)

Clasificación trófica	Valor del índice
Oligotrófico	< 44
Mesotrófico	44 -54
Eutrófico	>54

Fuente: Toledo, *et al.*

⁸⁷ CARLSON, R. A trophic state index for lakes. *En: Limnology and Oceanography*. 1977, vol. 22. no. 2. p. 365.

⁸⁸ KRATZER, C and BREZONIK, P. Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida. *Water resources Bulletin*. 1981. Citado por: MERCANTE, C y TUCCI-MOURA, A. Comparação entre os índices de Carlson e Carlson modificado, aplicados a dois ambientes aquáticos subtropicais, São Paulo, SP. *En: Acta Limnológica Brasiliensia*. 1999, vol. 11. p. 5.

⁸⁹ TOLEDO, JR, *et al.* A aplicação de modelos simplificados para a avaliação e processo de eutroficação em lagos e reservatórios tropicais. 1983. Citado por: MERCANTE, C y TUCCI-MOURA, A. Op. cit. p. 5-6.

4. RESULTADOS

4.1 CASO 1. CIÉNAGA DE AYAPEL

4.1.1 Información de referencia. Según valores de clorofila-a calculados *in-situ*, se identificaron variaciones en la concentración en cada estación y periodo de muestro (Tabla 6), sin embargo, no se identifica una tendencia clara en el cambio. En la época de aguas bajas (mayo) se presentaron los valores más altos de clorofila-a (entre 8,788 y 26,995 mg/m³) y los más bajos para la época de aguas altas en descenso (diciembre, entre 2,90 y 20,72 mg/m³). Incluso, se registraron variaciones espaciales en el mismo periodo hidrológico (septiembre, octubre).

Tabla 6. Concentraciones de clorofila-a (*in-situ*) registradas en la Ciénaga de Ayapel para los periodos de aguas bajas en ascenso (septiembre, octubre de 2015) y aguas altas en descenso (diciembre, 2015) en las diferentes estaciones de muestreo.

Estación	Coordenadas N	Coordenadas W	Fecha	Cl-a (mg/m ³)
1	8°18'45,46"	75°05'53,08"	Mayo	8,789
			Septiembre	6,240
			Octubre	8,843
			Diciembre	20,720
2	8°18'10,60"	75°07'57,15"	Mayo	15,603
			Septiembre	16,553
			Octubre	11,148
			Diciembre	
3	8°16'48,10"	75°08'42,62"	Mayo	12,674
			Septiembre	12,775
			Octubre	17,490
			Diciembre	
4	8°23'38,67"	75°04'31,03"	Mayo	22,273
			Septiembre	10,792
			Octubre	11,341
			Diciembre	
5	8°17'32,18"	75°06'31,22"	Mayo	23,013
			Septiembre	6,132
			Octubre	11,080
			Diciembre	14,800
6	8°21'47,74"	75°05'08,89"	Mayo	21,096
			Septiembre	8,154
			Octubre	
			Diciembre	2,960
7	8°21'52,08"	75°03'09,15"	Mayo	14,821
			Septiembre	6,132
			Octubre	9,570
			Diciembre	
8	8°24'02,56"	75°04'49,17"	Mayo	26,995
			Septiembre	7,657
			Octubre	9,831
			Diciembre	2,960

Fuente: Zábala, A.

En general las características fisicoquímicas del sistema (Tabla 7) presentan amplia variabilidad espacial y temporal. En el periodo de aguas bajas en ascenso, la transparencia (DS) es baja (entre 0,25 y 1,8 m), los valores más altos se registraron en las zonas más profundas de la ciénaga (estación 5 y 6). La conductividad eléctrica presenta una tendencia de cambio similar entre estaciones, los valores más altos se presentaron en las estaciones 7 y 8, mientras que los más bajos en las estaciones 3 y 5. El pH osciló entre 6,3 y 7,19, indicó aguas ligeramente neutras a ligeramente ácidas. El oxígeno disuelto fluctuó entre 3,3 a 8,11 mg/l.

El periodo de aguas altas en descenso al igual que el periodo de aguas bajas en ascenso, presentó baja transparencia, con valores que oscilan entre 0,22 y 1,09 m, la conductividad varió significativamente a nivel espacial, el valor más alto se registró en la estación 7 (208,3 $\mu\text{S/cm}$) y el más bajo en la estación 5 (43,7 $\mu\text{S/cm}$), el pH osciló entre 6,7 y 7,4, el oxígeno disuelto presentó valores muy bajos en estaciones 6 y 7 (2,19 y 1,72 mg/l) respectivamente, y el valor más alto en la estación 2 (7,07 mg/l).

Tabla 7. Registro de variables fisicoquímicas en diferentes sectores de la Ciénaga de Ayapel en los periodos de muestreo *in-situ*.

Fecha	Estación	DS (m)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	OD (mg/l)	pH
Aguas bajas en ascenso (Septiembre, 2015)	1	0,38	168	4,4	6,96
	2	0,32	96,9	5,85	7,02
	3	0,27	79,3	6,1	6,83
	5	1,11	44,9	4,08	6,58
	6	1,8	116,5	5,24	6,85
	7	0,43	170,3	6,49	7,19
	8	0,32	136,3	5,12	6,9
Aguas bajas en ascenso (Octubre, 2015)	1		114,6	3,13	6,5
	2	0,25	78,5	8,11	6,9
	3	0,27	50,1	6,79	6,7
	5		26,4	4,55	6,3
	6		107,8	3,51	6,7
	7		167,4	5,03	6,9
	8		117,3	5,31	6,9
Aguas altas en descenso (Diciembre, 2015)	1	0,37	118,8	3,71	6,9
	2	25	91,2	7,07	7,4
	3	0,22	69,4	6,14	7
	5	1,09	43,7	3,19	6,7
	6	0,8	101,5	2,19	7,1
	7	0,88	208,3	1,72	7,1
	8	0,52	139,2	4,59	7,2

Fuente: Zábala, A.

4.1.2 Preprocesamiento de las imágenes de satélite. Los valores de reflectancia calculados para las seis (6) primeras bandas del espectro electromagnético (Landsat-8 septiembre 2015) y la concentración de clorofila-*a* (*in-situ*), para cada estación de muestreo, evidenciaron cambios espaciales, los valores oscilan entre 0,026 y 0,309 (Tabla 8), datos que se encuentran en el rango 0 a 1 de reflectancia.

Tabla 8. Valores de reflectancia para las diferentes estaciones de muestreo (septiembre 2015).

Estación	Cl-a (mg/m ³) <i>in-situ</i>	Banda	Reflectancia	Estación	Cl-a (mg/m ³) <i>in-situ</i>	Banda	Reflectancia
1	6,24	1	0,139	5	6,132	1	0,098
		2	0,091			2	0,083
		3	0,099			3	0,083
		4	0,143			4	0,089
		5	0,159			5	0,171
		6	0,073			6	0,094
2	16,553	1	0,158	6	8,154	1	0,133
		2	0,1			2	0,084
		3	0,112			3	0,093
		4	0,16			4	0,126
		5	0,139			5	0,112
		6	0,07			6	0,052
3	12,775	1	0,126	7	6,132	1	0,121
		2	0,098			2	0,076
		3	0,101			3	0,086
		4	0,115			4	0,111
		5	0,266			5	0,095
		6	0,126			6	0,048
4	10,792	1	0,082	8	7,657	1	0,115
		2	0,026			2	0,059
		3	0,038			3	0,073
		4	0,06			4	0,105
		5	0,309			5	0,09
		6	0,121			6	0,041

Fuente: Autor.

4.1.3 Cálculo de modelos. Las tablas 9 y 10 muestran los coeficientes de determinación r^2 más altos obtenidos a partir de los modelos de regresión (múltiple y simple) realizados por diferentes combinaciones de banda. En general las bandas que explican el comportamiento de la variable clorofila-*a* son las bandas: azul (b1), verde (b2), rojo (b3) e infrarrojo cercano (b5). Normalmente la clorofila-*a* tiene un efecto distintivo en el espectro de reflectancia, con picos de absorción entre 400nm y 670nm⁹⁰.

⁹⁰ NAS, B. *et al.* Op. cit. p. 378.

Para las regresiones múltiples, el coeficiente de correlación de Spearman (r) mostró buena asociación entre variables, (entre 0,71 y 0,90); el coeficiente de determinación (r_a^2) logró explicar del 22,7% al 56,3%. Las regresiones simples presentaron bajos niveles de asociación (entre 0,05 y 0,31) y el coeficiente de determinación (r^2) logró explicar del 16% al 35% por tal razón, el estadístico de regresión simple no es confiable para espacializar y analizar la concentración de la clorofila-a en el sistema de interés.

Tabla 9. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones múltiples en la Ciénaga de Ayapel.

Bandas	r	r²	r_a²
b2,b3,b4,b5	0,879	0,772	0,468
b2,b3,b5	0,833	0,695	0,466
b3*b4,b5	0,708	0,501	0,302
b5*b4,b2/b3	0,670	0,448	0,227
b4*b5,b2,b3	0,764	0,584	0,272
b5/b4,b2,b3	0,867	0,750	0,563
b4/b5,b2,b3	0,841	0,708	0,488
b2,b3,promedio(b4,b5)	0,808	0,653	0,392
b2,3,4,5,6	0,900	0,806	0,321
(b2,b3,b4,b5) ²	0,887	0,786	0,502
b5 ² /b4 ² , b3,b4	0,838	0,703	0,480

Fuente: Autor

Tabla 10. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones simples en la Ciénaga de Ayapel.

Bandas	r	r²
b5*b4	0,156	0,355
Promedio (b2,b3,b5)	0,182	0,283
Promedio (b2,b3,b5,b4)	0,315	0,386
Promedio (b3,b5,b4)	0,287	0,402
Promedio (b4,b5)	0,045	0,319
b4*b3	0,293	0,161
b2*b5	0,165	0,168

Fuente: Autor

De esta forma, el modelo de regresión múltiple con mejor bondad en el ajuste, correspondió a la combinación de bandas **b5/b4**, **b2**, **b3** (variables independientes), ya que explicó el 56,32% de la variabilidad de la concentración de clorofila-a (variable dependiente).

Dado el nivel de correlación del modelo de regresión múltiple, su expresión matemática (ecuación 6) fue seleccionada para el cálculo de la concentración

de clorofila-a. Esta expresión permite estimar para “n” variables de la forma X_1, X_2, X_n , los coeficientes de regresión $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$ (constantes) y el nuevo valor de la variable “Y”. Por lo tanto, para el caso de la Ciénaga de Ayapel, se obtuvieron los coeficientes de regresión de cada variable ($b_5/b_4, b_2, b_3$) (Tabla 11) y la ecuación final (ecuación 7).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n \dots \text{ (ecuación 6)}$$

Tabla 11. Estadísticas de la regresión múltiple seleccionada.

Variable	Coeficientes (β)	Error típico
Intercepción	-21,899	9,095
X_1 (b_5/b_4)	3,399	1,090
X_2 (b_2)	-521,641	225,672
X_3 (b_3)	764,968	269,239

Fuente: Autor

$$Cl - a = -21,899 + 3,399 * \left(\frac{b_5}{b_4} \right) - 521,64 * b_2 + 764,968 * b_3 \text{ (ecuación 7)}$$

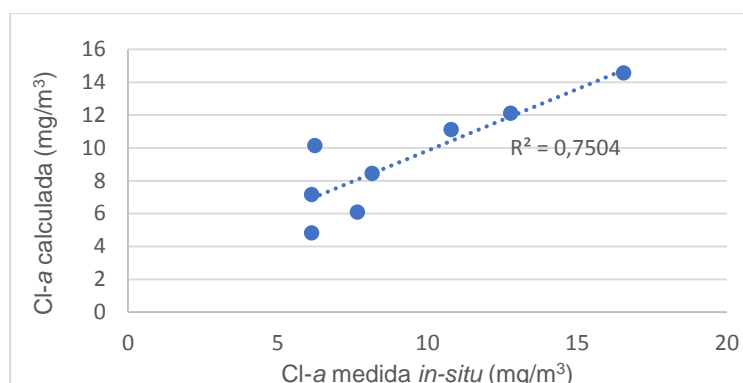
4.1.4 Validación del modelo. El modelo calculado sugiere que existe buena relación entre los valores de concentración de clorofila-a medidos *in-situ* y los calculados con el modelo de regresión múltiple. El coeficiente de variación(CV) promedio indica baja variabilidad en los datos (11,89%), el valor que menos se ajusta a esta tendencia corresponde a la estación 1 con un CV del 33% (Tabla 12). Adicionalmente, el coeficiente de determinación (r^2), muestra buena correlación entre estas variables con 75,04% de la varianza explicada (Figura 13).

Tabla 12. Coeficientes de variación (CV) de los datos de clorofila-a tomados *in-situ* respecto a los valores calculados de la información satelital para la Ciénaga de Ayapel.

Estación	Cl-a <i>in-situ</i> (mg/m ³)	Cl-a calculada (mg/m ³)	CV (%)	promedio CV (%)
1	6,240	10,143	33,691	11,878
2	16,553	14,566	9,029	
3	12,775	12,105	3,811	
4	10,792	11,114	2,083	
5	6,132	4,828	16,827	
6	8,154	8,446	2,494	
7	6,132	7,153	10,859	
8	7,657	6,080	16,233	

Fuente: Autor.

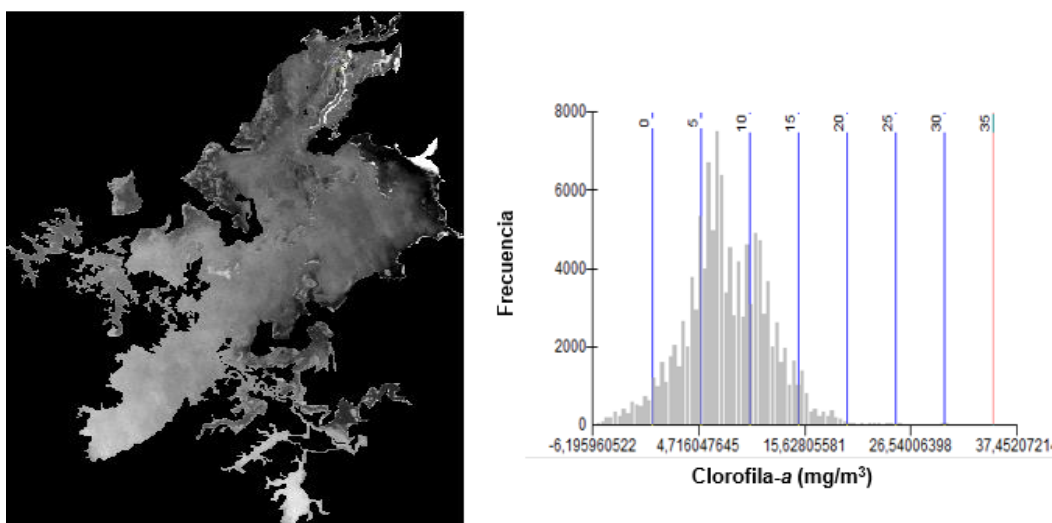
Figura 13. Relación entre los valores de clorofila-a calculados del modelo de regresión y los valores clorofila-a medidas *in-situ* para la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

4.1.5 Aplicación del modelo. El modelo seleccionado permitió estimar la distribución espacial de clorofila-a en la imagen de satélite respecto a los valores de reflectancia obtenidos. El valor máximo calculado para el periodo de septiembre de 2015 fue de 37,45 mg/m³, el valor mínimo de -6,196 mg/m³. Según la distribución de los valores de clorofila-a en el histograma, se determinaron intervalos cada 5 mg/m³ (Figura 14), esto con el fin de generar mapas temáticos de la distribución espacial de la clorofila-a en cada periodo hidrológico establecido.

Figura 14. Izquierda, salida gráfica de la distribución de la concentración de clorofila-a, aplicación del modelo en la ciénaga de Ayapel, septiembre de 2015. Derecha, histograma de la concentración de clorofila-a.

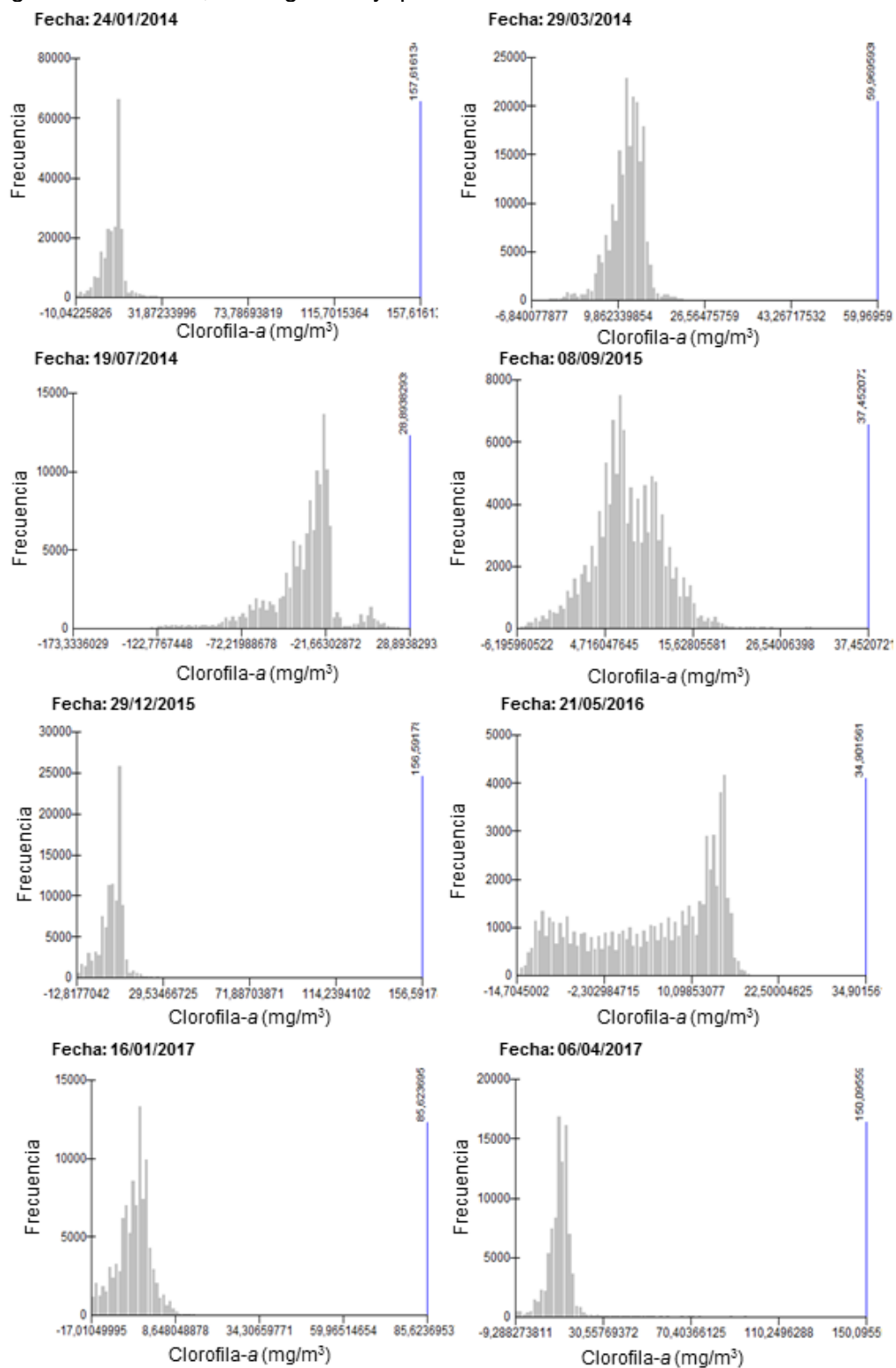


Fuente: Autor.

La aplicación de modelo en todas las imágenes Landsat-8 seleccionadas para la Ciénaga, generó dos series de datos atípicos para la estimación de clorofila-a, según los valores evidenciados en los histogramas de cada imagen (Figura 15): 1. Valores negativos, que sugieren la presencia de otras superficies diferentes al espejo de agua, como sedimentos o macrófitas terrestres 2. Valores muy elevados que no se dan generalmente en este sistema, en este caso mayores a 60mg/m^3 , esto sugiere la presencia de nubosidad y/o sombra generada por las nubes. Estos valores están tipificados en los mapas de distribución espacial de clorofila-a como: “otros valores”.

Las imágenes Landsat-8 de julio de 2014 y enero de 2017, no presentaron adecuada distribución espacial de clorofila-a, el 90% de los valores corresponde a datos atípicos (valores negativos); esto se debe a la presencia reflectancias negativas en ciertas bandas, especialmente la banda 5, (incluida en el modelo de regresión); por ello, no se incluyeron en el análisis espacial y temporal.

Figura 15. Histogramas de distribución de concentración de clorofila-a para las imágenes Landsat-8, Ciénaga de Ayapel.

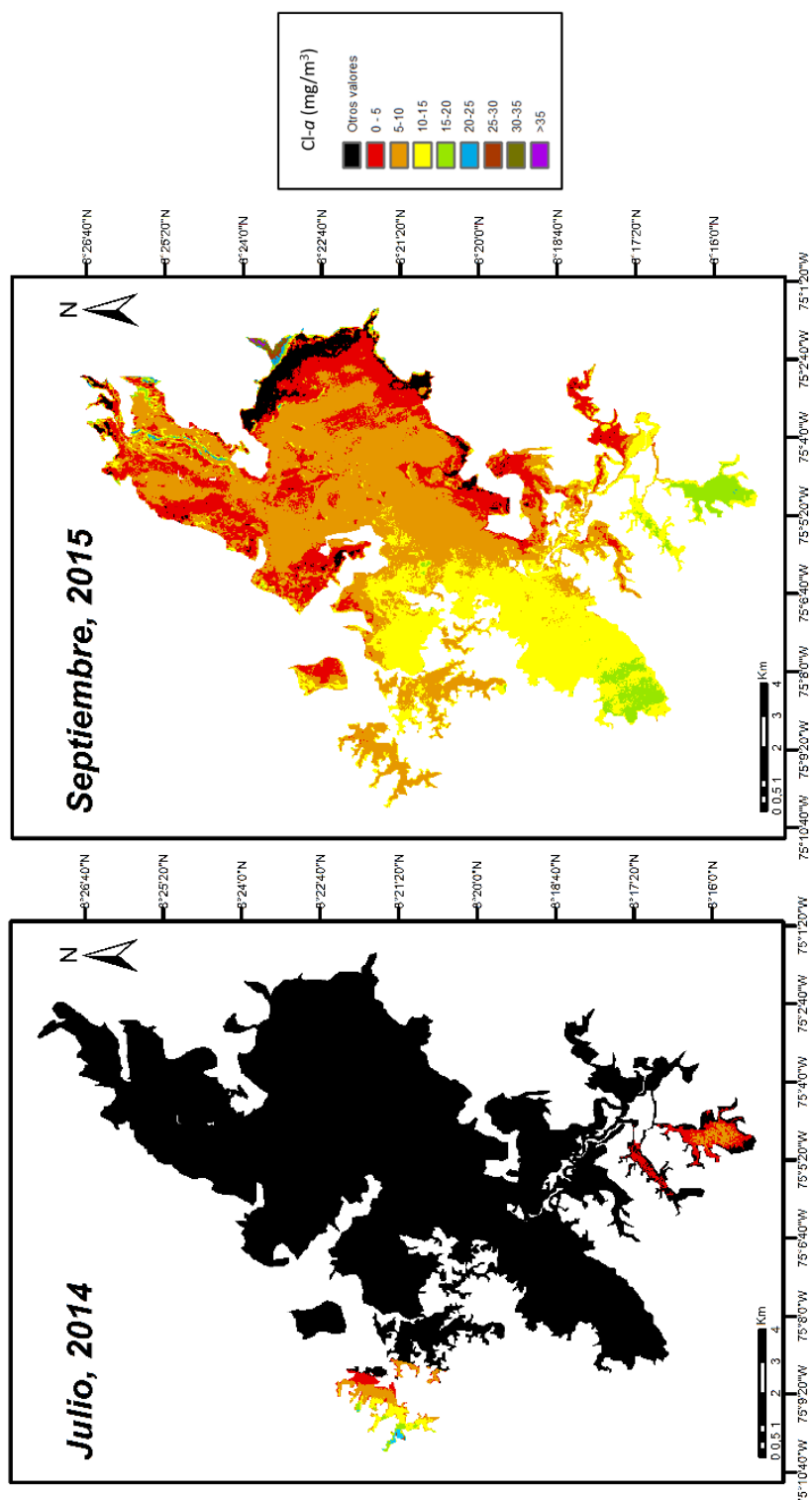


Fuente: Autor, elaborado en ArcGis 10.3.1.

4.1.6 Variación espacio temporal de clorofila-a. Dada la naturaleza de la Ciénaga de Ayapel como un sistema muy heterogéneo y dinámico, la variación espacio-temporal se presenta por periodo hidrológico y por zona:

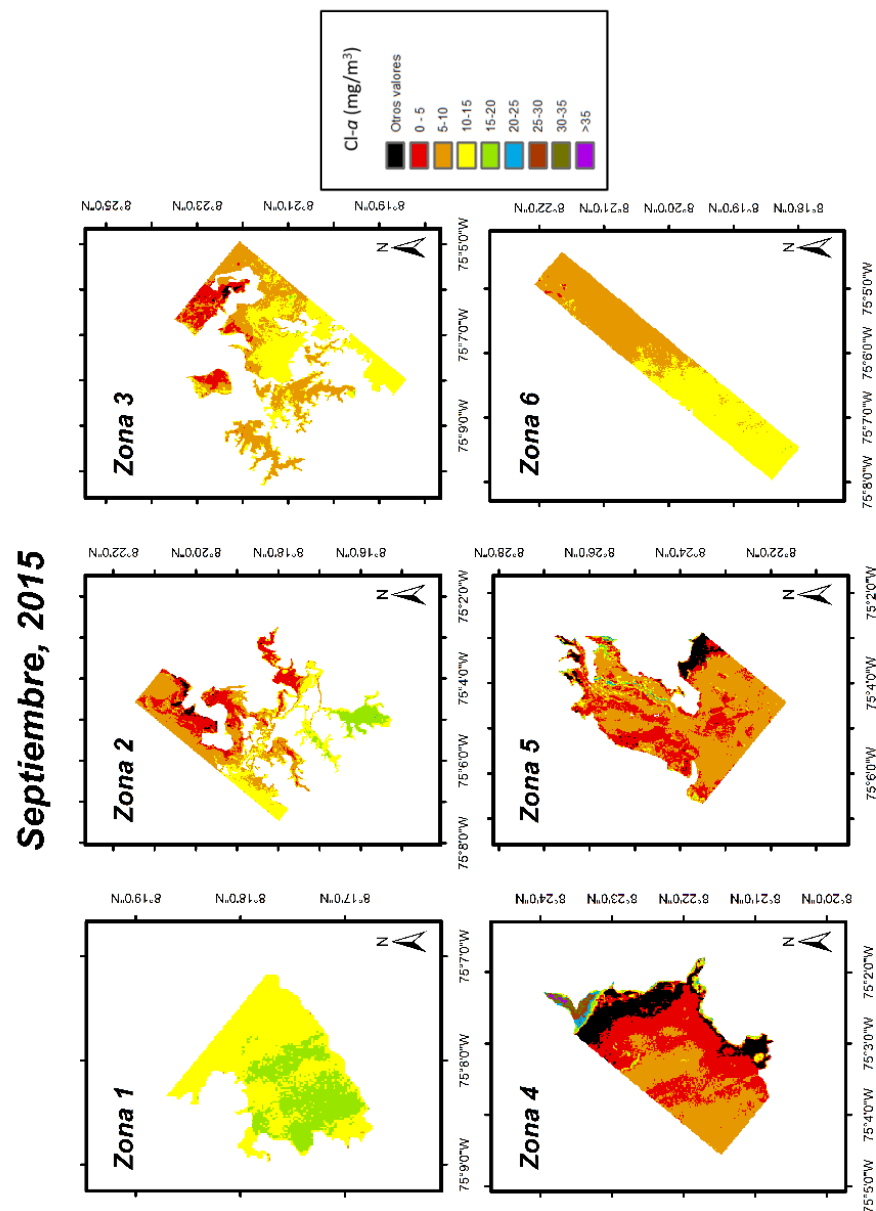
Aguas bajas en ascenso: la variación de clorofila-a estuvo marcada en sentido norte-sur en la ciénaga, la concentración más alta se presentó en la zona sur (Figura 16). La zona 1 presenta los valores más elevados (10-20 mg/m³), seguido de la zona 3 (10 -15 mg/m³), la zona 2 es más heterogénea con valores de 0 a 20 mg/m³; las zonas 4 y 5 presentan los valores más bajos (0-5 mg/m³) y la zona 6 (limnética) se encuentra en el rango 5 a 15 mg/m³ (Figura 17).

Figura 16. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a, periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

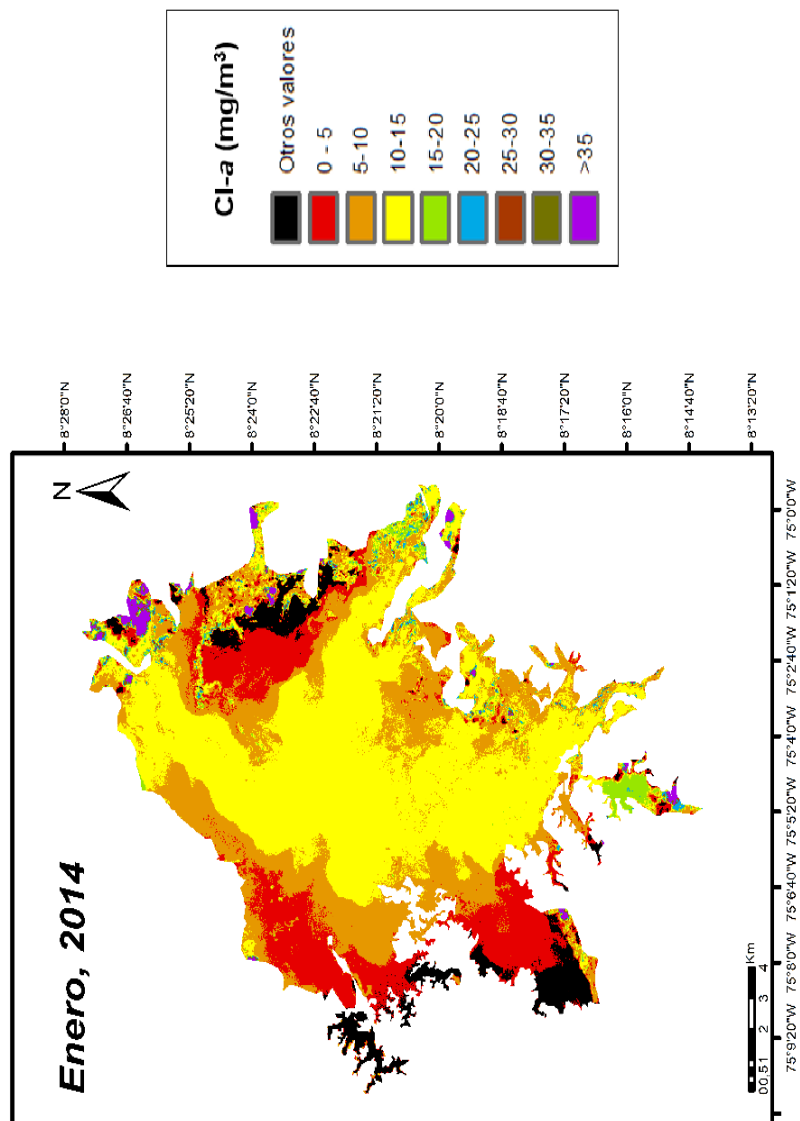
Figura 17. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

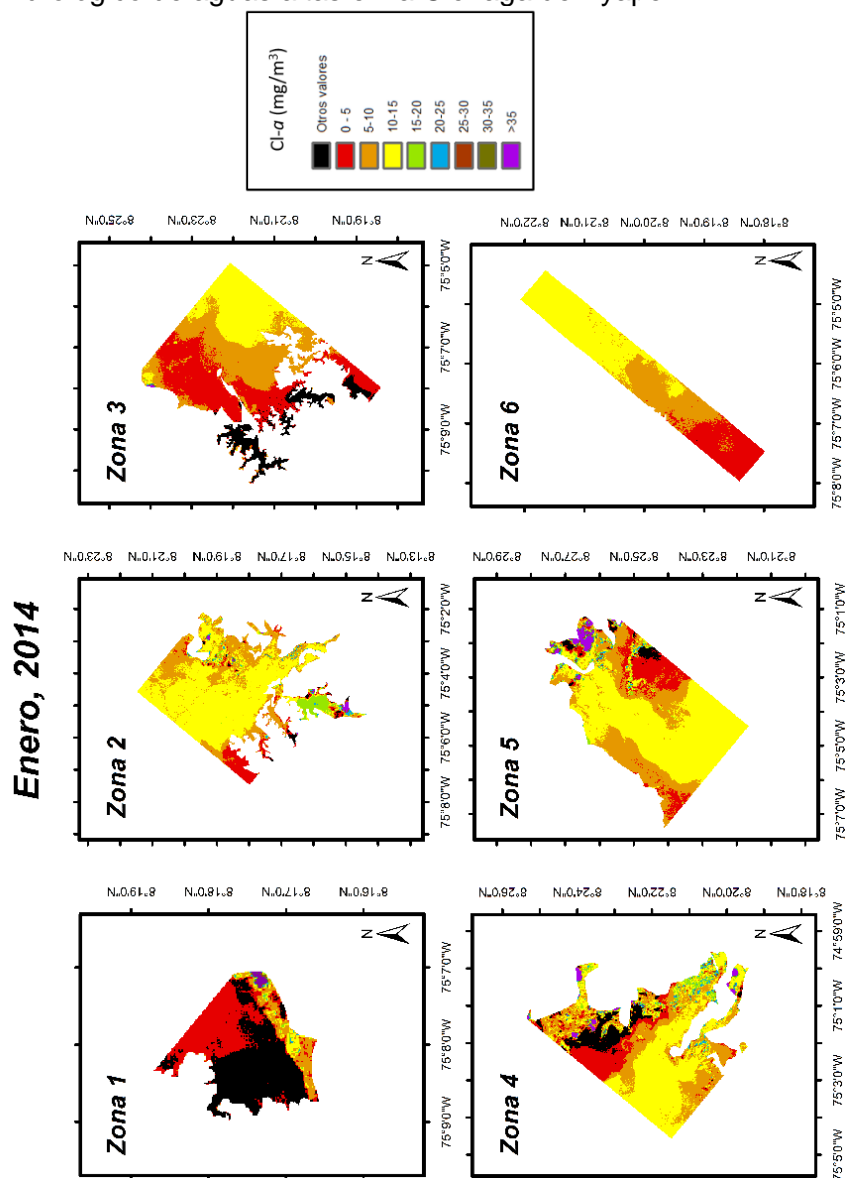
Aguas altas: Se evidencia una variación de la concentración de clorofila-a desde el litoral hacia la zona limnética, los mayores valores se encuentran en esta última (10-15 mg/m³) (Figura 18). La zona 1 presenta los valores más bajos (0-5 mg/m³), mientras que las zonas 2 y 4 presentan los más altos (10-15 mg/m³) e incluso en menor proporción mayores a 35 mg/m³. Las zonas 4 y 5 son más heterogéneas debido a concentraciones de 10 a 35 mg/m³ (Figura 19).

Figura 18. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a, periodo hidrológico de aguas altas en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

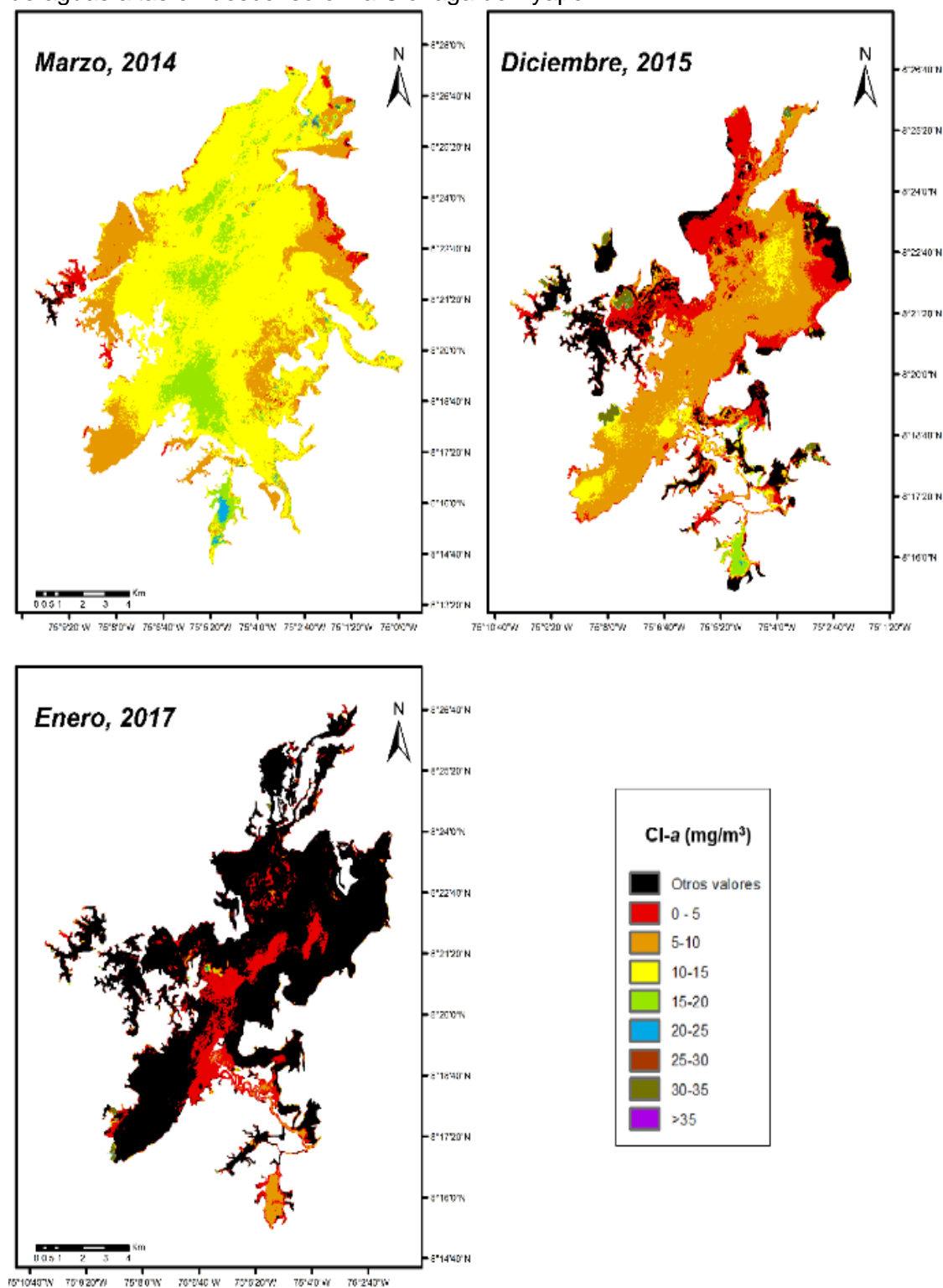
Figura 19. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas altas en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

Aguas altas en descenso: Presenta cambio importante del área inundada, siendo mayor en marzo de 2014 respecto a diciembre de 2015. La variación de la concentración de clorofila-a, es evidente a nivel temporal (Figura 20), con una disminución de los valores medios en diciembre ($5-10 \text{ mg/m}^3$) con respecto a marzo ($10-15 \text{ mg/m}^3$). Los valores máximos registrados, se encuentran para marzo en la zona 2 ($15-20 \text{ mg/m}^3$) y para diciembre en las zonas 1 y 2 ($10-20 \text{ mg/m}^3$), los menores ($0-5 \text{ mg/m}^3$) en las zonas 3 y 4 en marzo, y 3, 4, 5 en diciembre (Figura 21).

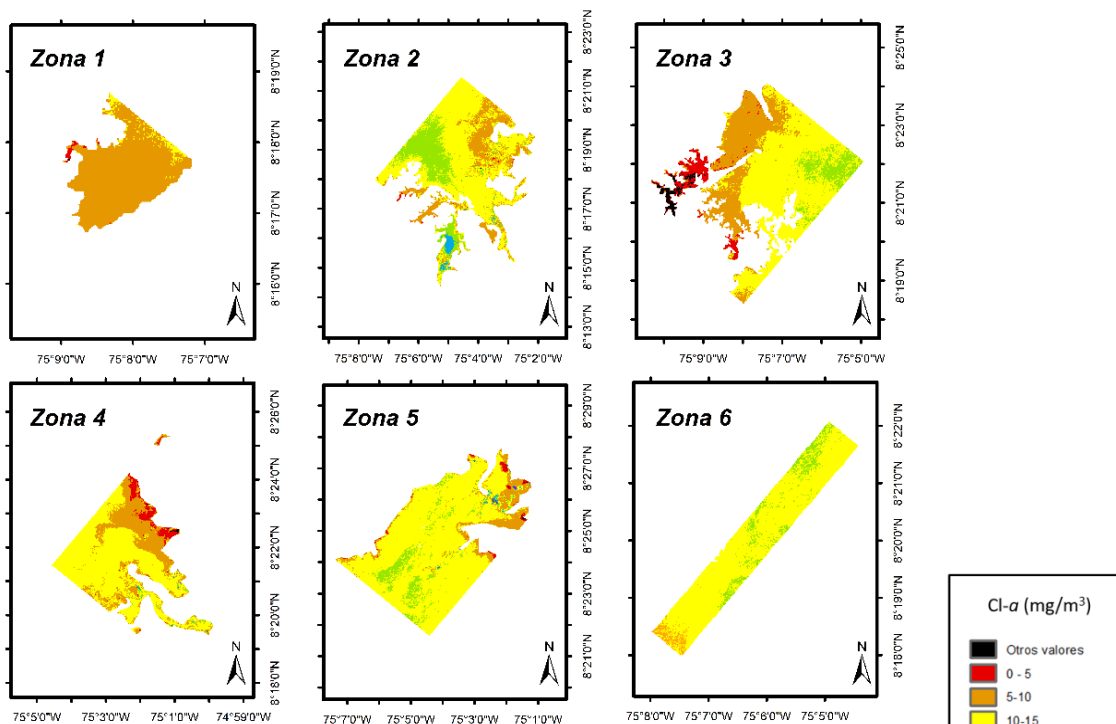
Figura 20. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a, periodo hidrológico de aguas altas en descenso en la Ciénaga de Ayapel.



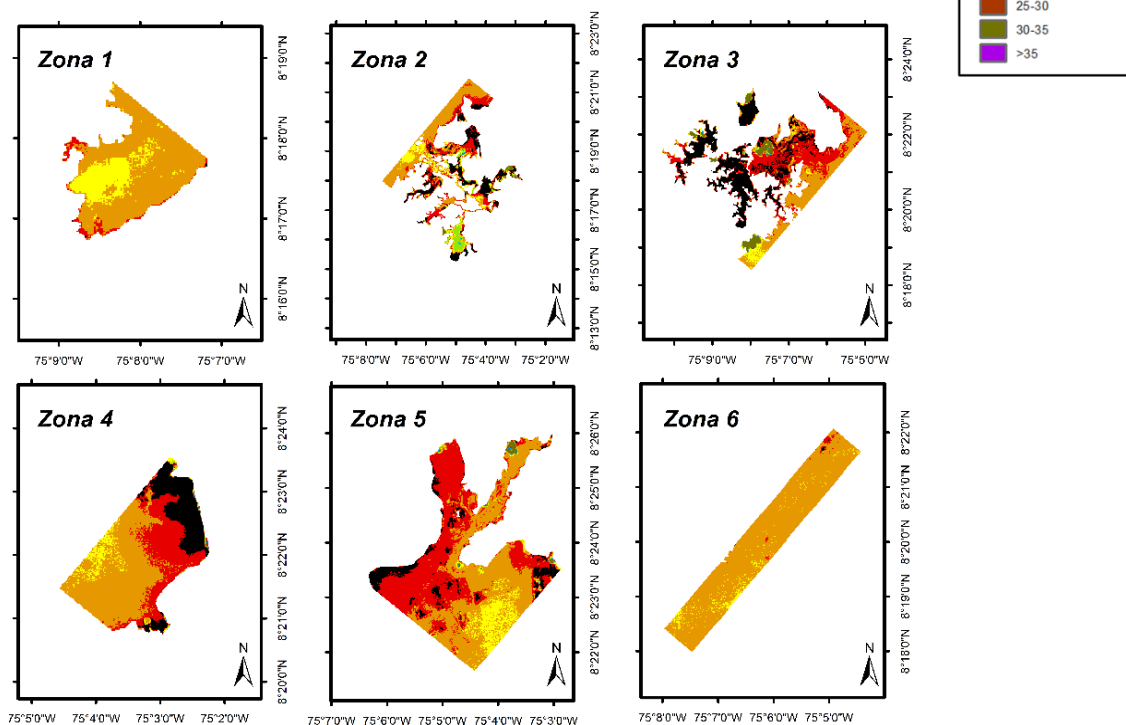
Fuente: Autor.

Figura 21. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas altas en descenso en la Ciénaga de Ayapel.

Marzo, 2014



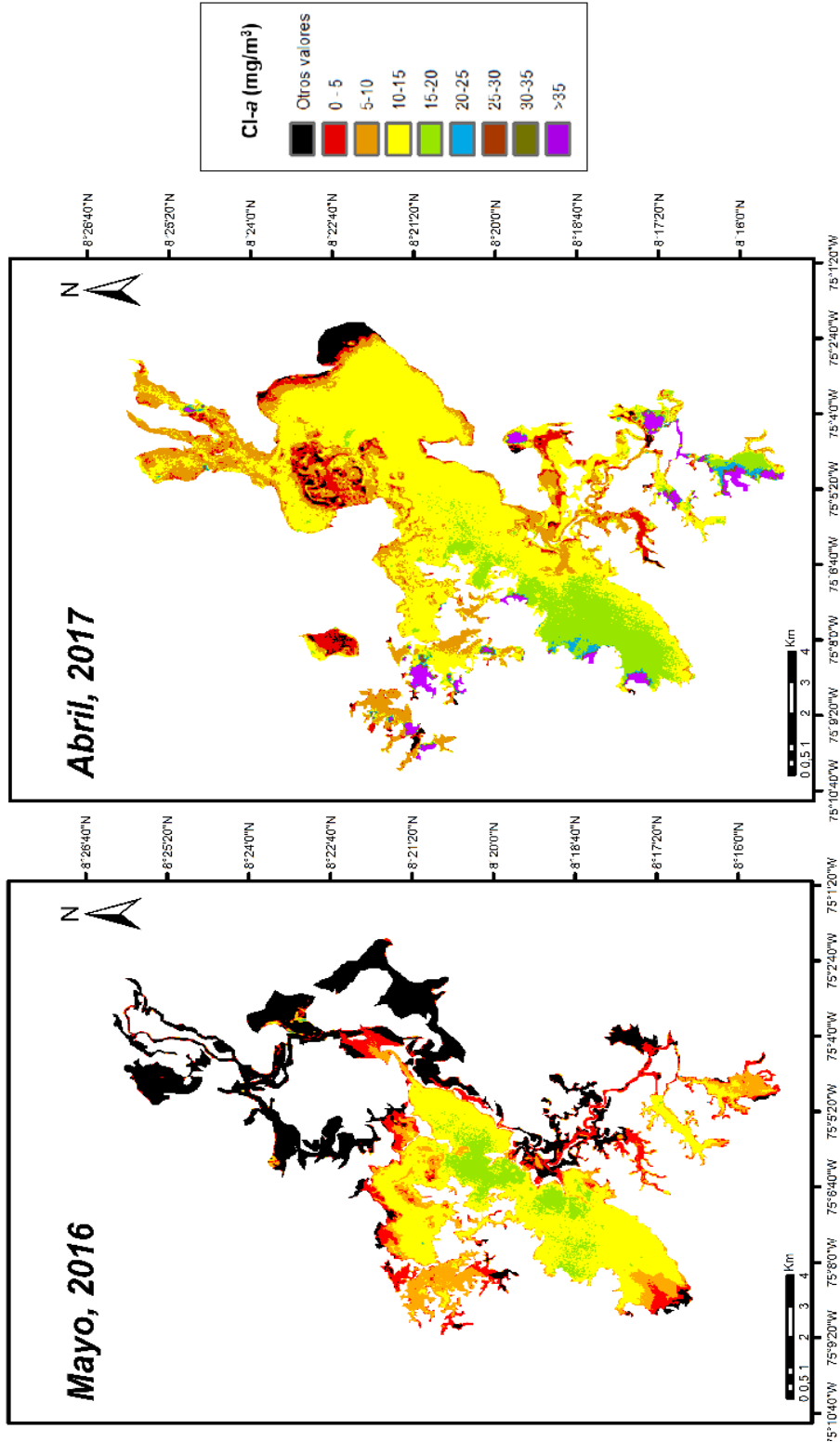
Diciembre, 2015



Fuente: Autor.

- **Aguas bajas:** En este periodo, la variación de clorofila-*a* fue más evidente a nivel temporal que espacial (Figura 22). Se evidenció un aumento de valores medios en la mayoría las zonas para abril de 2017 (15-20 mg/m³) respecto a mayo de 2016 (10-15 mg/m³). Para las dos fechas la zona 6 (limnética) no presenta variaciones importantes, se mantiene en el rango de 10 a 15 mg/m³. En mayo, las zonas 3 y 4 presentan menor porcentaje de área inundada, y se registraron valores de 0 a 5 mg/m³, los valores son negativos y se asocian a otras coberturas como: **1.** suelo expuesto producto de procesos de desecación en el periodo, **2.** vegetación terrestre colonizadora; en contraste, el área de inundación es mayor en el mes de abril y los valores varían al rango 10 a 15 mg/m³. El mes que presenta los valores más altos (>35mg/m³) es abril en las zonas 1 y 3 (Figura 23).

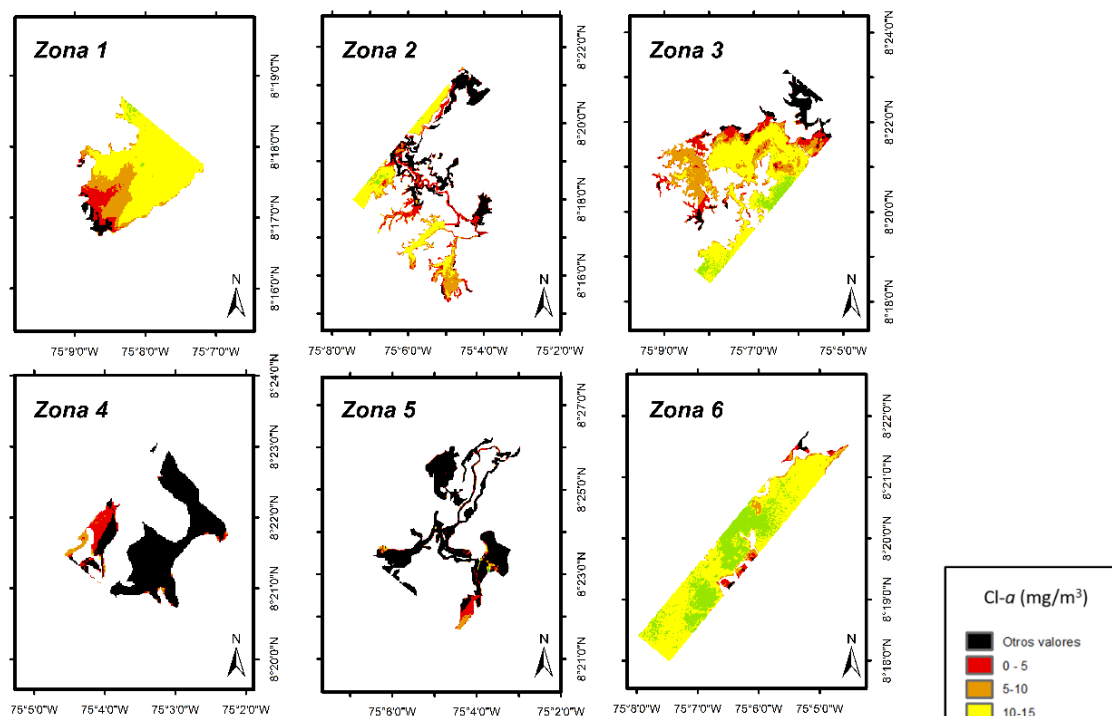
Figura 22. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a, periodo hidrológico de aguas bajas en la Ciénaga de Ayapel.



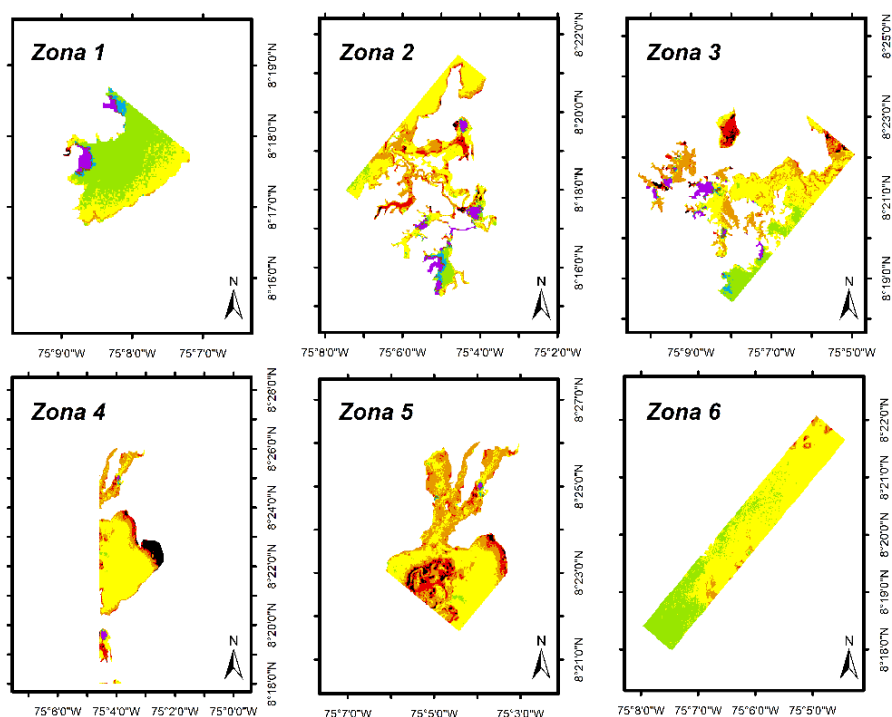
Fuente: Autor.

Figura 23. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a para cada zona, en el periodo hidrológico de aguas bajas en la Ciénaga de Ayapel.

Mayo, 2016



Abril, 2017

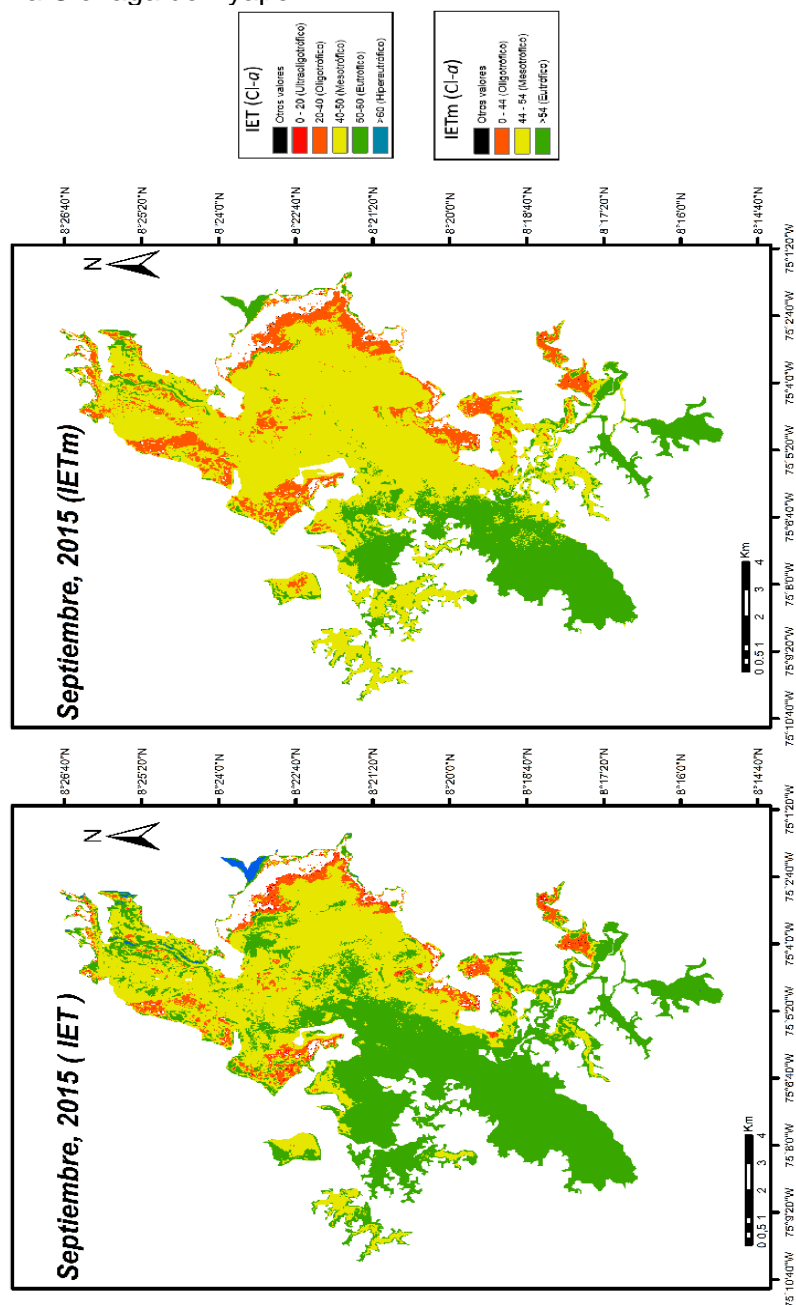


Fuente: Autor.

Valoración del estado trófico (IETm). En términos generales, la Ciénaga de Ayapel se incluye en la categoría trófica de “eutrófico”, debido a que la tendencia, de la mayoría de los periodos hidrológicos expresan esta condición. Sin embargo, en el periodo de aguas bajas en ascenso se presenta variación espacial interesante referida a un eje norte-sur, con nivel trófico mayor en la zona sur, y para los periodos hidrológicos restantes, variación desde el litoral hacia el interior de la ciénaga con nivel trófico superior (eutrófico) en el interior.

En el periodo de aguas bajas en ascenso, se evidenció una tendencia de cambio de condición eutrófico (zonas 1, 2, 3, 6) a mesotrófico (zonas 4, 5, 6) en sentido sur-norte, tanto para el IET como para el IETm (Figura 24). Se registraron en menor proporción: condición oligotrófica en las zonas 2, 4 y 5 asociados al litoral de la ciénaga y condición hipertrófico en la zona 4, sector aislado.

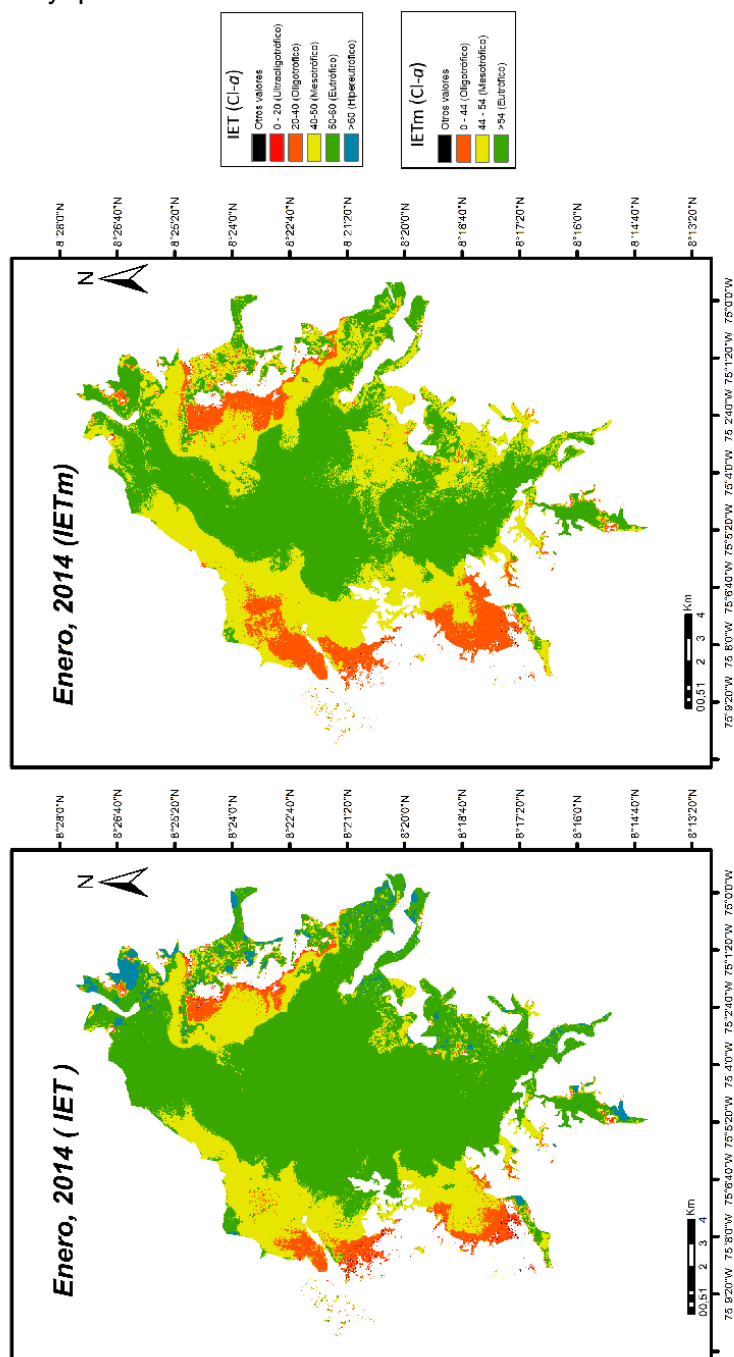
Figura 24. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el periodo hidrológico de aguas bajas en ascenso en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

El periodo de aguas altas mantiene la condición de eutrófico (Figura 25), excepto la zona 1 (mesotrófico y oligotrófico). Sin embargo, se presentan áreas con categorías como: mesotrófico (todas las zonas) y oligotrófico (zonas 1, 3, 4). A diferencia de los otros periodos la variación ocurre desde el litoral hacia el interior de la ciénaga.

Figura 25. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el periodo hidrológico de aguas altas en la Ciénaga de Ayapel.

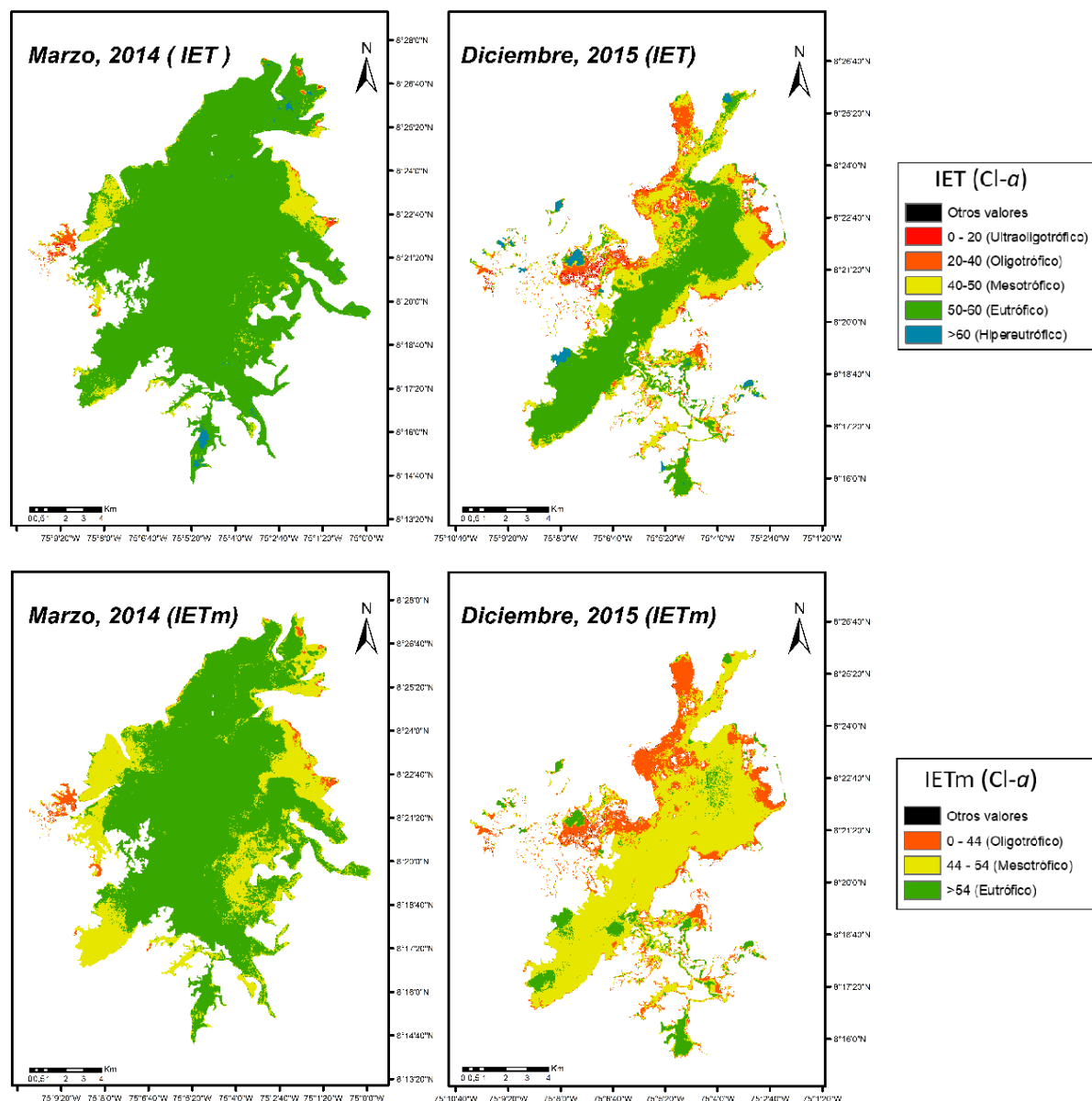


Fuente: Autor.

El periodo de aguas altas en descenso, evidencia un cambio importante de marzo de 2014 a diciembre de 2015 (eutrófico a mesotrófico), y en el caso

singular del litoral asociado a las zonas 4 y 5 (eutrófico a oligotrófico), hecho que es más evidente con el IETm respecto al IET (Figura 26).

Figura 26. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el periodo hidrológico de aguas altas en descenso en la Ciénaga de Ayapel.

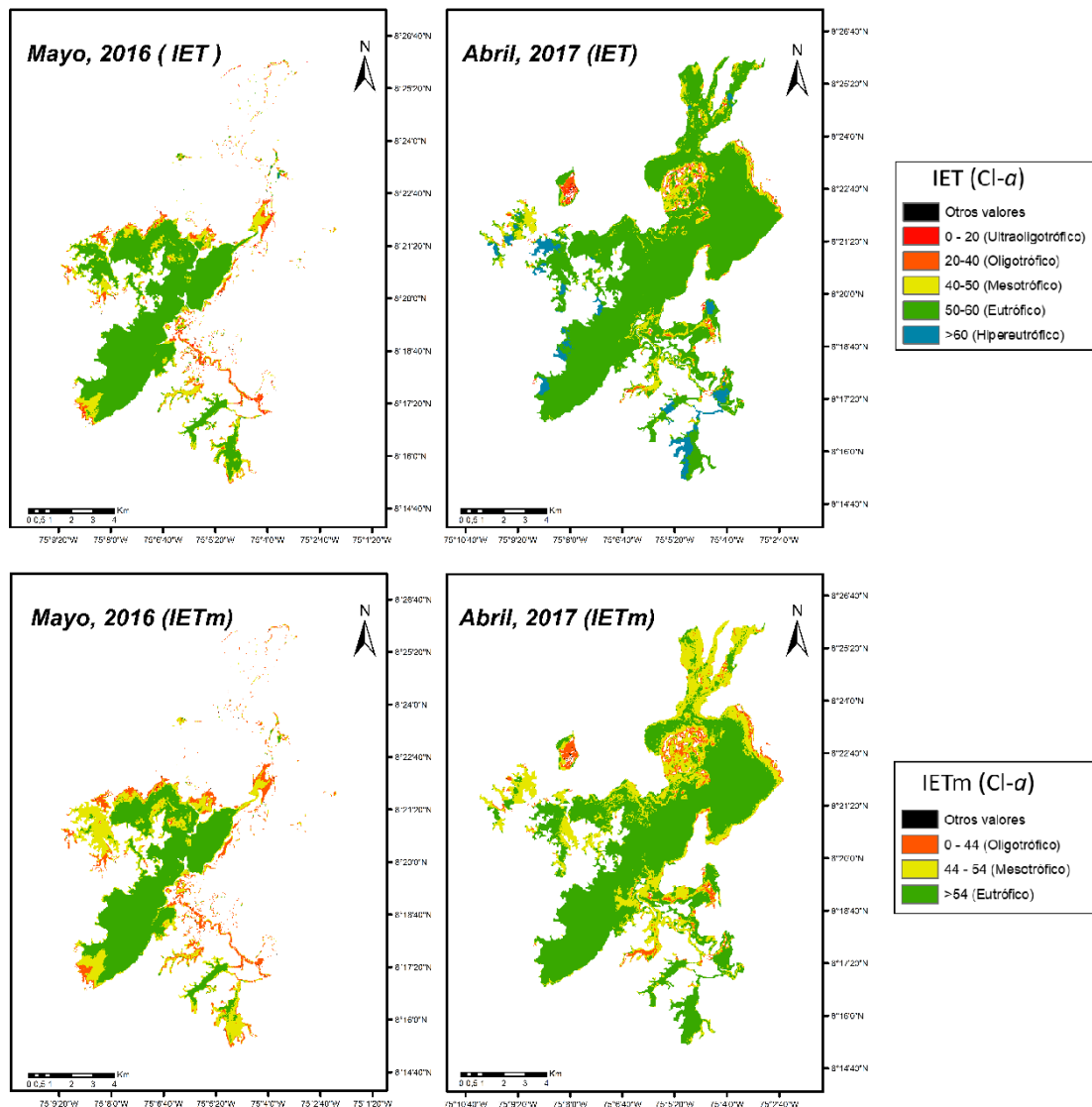


Fuente: Autor

En el periodo de aguas bajas, en general persiste la categoría de eutrófico tanto a nivel espacial como temporal (Figura 27). Excepto la zona 1, que evidenció en un incremento en el estado trófico a nivel temporal, dado que mayo presentó las categorías de oligotrófico y mesotrófico y abril la categoría

de eutrófico. El IET muestra para el caso de abril de 2017, dos condiciones contrastantes de las categorías tróficas en menor proporción: hipereutrófico (zonas 1, 2, 3) y oligotrófico (zona 5).

Figura 27. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el periodo hidrológico de aguas bajas en la Ciénaga de Ayapel.



Fuente: Autor.

4.2 CASO 2. LAGO DE TOTA.

4.2.1 Información de referencia. En la tabla 13 se observa la concentración de clorofila-a tomada *in-situ*. Estos valores evidencian baja diferenciación

espacial, oscilan entre 1,11 y 6,5 mg/m³; sin embargo, se presenta un valor de 28,38 mg/m³ que corresponde a la estación número 7, se destaca en esta la presencia de *Egeria densa* (Elodea) a 1 metro de profundidad, este valor se vio afectado por la incorporación de esta macrófita en la lectura del espectrofotómetro, por lo que no se incluye en el análisis posterior.

Tabla 13. Concentraciones de clorofila-a (*in-situ*) tomadas el 22 de enero de 2018, para diferentes estaciones ubicadas en el Lago de Tota.

Estación	Coordenadas N	Coordenadas W	Cl-a (mg/m ³)
1	5° 33' 19,5"	72° 54' 01,50"	2,336
2	5° 33' 27,50"	72° 54' 19,20"	4,723
3	5° 33' 38,70"	72° 54' 24,10"	2,996
4	5° 34' 57,50"	72° 54' 26,20"	2,844
5	5° 34' 23,50"	72° 54' 22,10"	1,625
6	5° 34' 38,50"	72° 54' 15,90"	6,501
7	5° 34' 54,10"	72° 54' 27,30"	28,381
8	5° 34' 53,90"	72° 54' 35,90"	2,082
9	5° 34' 47,70"	72° 55' 00,60"	2,133
10	5° 34' 30,20"	72° 55' 36,10"	2,742
11	5° 33' 20,50"	72° 05' 35,80"	2,742
12	5° 32' 46,20"	72° 55' 41,50"	3,047
13	5° 32' 06,50"	72° 54' 53,40"	1,219
14	5° 31' 38,70"	72° 54' 21,50"	1,269
15	5° 31' 28,70"	72° 54' 05,00"	1,981
16	5° 32' 23,1"	72° 53' 25,40"	1,473
17	5° 32' 1,80"	72° 53' 27,40"	1,117
18	5° 33' 01,10"	72° 53' 13,30"	1,168

Fuente: Autor.

A excepción de la transparencia Secchi, las variables fisicoquímicas del sistema (Tabla 14), registran baja variabilidad espacial. El pH es neutro y ligeramente ácido, la conductividad osciló entre 102,9 y 109,9 (µs/cm), la transparencia presenta valores altos, característico de sistemas acuáticos altoandinos, valores más elevados en la zona limnética del lago (6,8 m).

Tabla 14. Registro de variables fisicoquímicas tomadas *in-situ* en diferentes estaciones del Lago de Tota.

Estación	pH	Conductividad (µs/cm)	Temperatura (°C)	DS (m)
1	6,56	102,9	15,4	5,8
2	6,95	109,9	15,6	-
3	7,09	107,2	15,7	-
4	7,2	107,1	15,7	-
5	7,3	107,2	15,7	-
6	7,31	107,3	15,7	4,8
7	7,48	106	15	-
8	7,54	107,1	15,7	6,2
9	7,54	107,1	15,89	-
10	7,61	107,1	15,8	-

11	7,7	106,9	15,7	-
12	7,65	107,1	15,6	7,5
13	7,7	106,9	15,6	-
14	7,62	107,3	15,6	6,8
15	7,64	107,4	15,4	5,3
16	7,51	107,6	15,4	5,1
17	7,4	107,7	15,5	5,5
18	7,36	107,7	15,7	5,7

Fuente: Autor.

4.2.2 Preprocesamiento de las imágenes de satélite. La tabla 15 relaciona los valores de reflectancia para 6 bandas del espectro electromagnético y las estaciones de muestreo. En este caso no existe una diferenciación marcada entre dichos valores a nivel espacial, además se registran datos negativos (no válidos físicamente) especialmente en la banda 2.

Tabla 15. Valores de reflectancia extraídos de la imagen satelital (enero 2018) para las diferentes estaciones de muestreo en el Lago de Tota.

Estación	Banda	Reflectancia	Estación	Banda	Reflectancia
1	1	0,007	10	1	0,007
	2	-0,004		2	-0,005
	3	0		3	-0,001
	4	0,002		4	-0,001
	5	0,003		5	0
	6	0,006		6	0,003
2	1	0,008	11	1	0,011
	2	-0,004		2	-0,002
	3	0,001		3	0,002
	4	0,001		4	0,002
	5	0,002		5	0,003
	6	0,005		6	0,006
3	1	0,005	12	1	0,011
	2	-0,008		2	-0,002
	3	-0,002		3	0,003
	4	-0,003		4	0,003
	5	-0,002		5	0,004
	6	0,002		6	0,007
4	1	0,012	13	1	0,011
	2	-0,003		2	0,002
	3	0,004		3	0,004
	4	0,004		4	0,004
	5	0,004		5	0,004
	6	0,008		6	0,008
5	1	0,009	14	1	0,007
	2	-0,005		2	-0,005
	3	0,001		3	0
	4	0,001		4	0
	5	0,001		5	-0,001
	6	0,004		6	0,003
6	1	0,004	15	1	0,006

Estación	Banda	Reflectancia	Estación	Banda	Reflectancia
	2	-0,008		2	-0,007
	3	-0,003		3	-0,001
	4	-0,004		4	-0,001
	5	-0,002		5	-0,001
	6	0,001		6	0,002
7	1	0,01	16	1	0,012
	2	-0,007		2	-0,002
	3	-0,002		3	0,004
	4	0,001		4	0,004
	5	0,001		5	0,038
	6	0,004		6	0,009
8	1	0,007	17	1	0,004
	2	-0,007		2	-0,008
	3	-0,002		3	-0,003
	4	-0,002		4	-0,003
	5	-0,001		5	-0,001
	6	0,002		6	0,002
9	1	0,006	18	1	0,004
	2	-0,007		2	-0,008
	3	-0,001		3	-0,002
	4	-0,002		4	-0,002
	5	-0,001		5	-0,001
	6	0,003		6	0,002

Fuente: Autor.

4.2.3 Cálculo de modelos. Se utilizaron las estaciones: 2 ,4, 5, 11, 12, 13 y 16 (Tabla 15), ya que presentaron valores positivos de reflectancia espectral. Además, se descartaron las estaciones con el valor de reflectancia de cero (0), pues este valor solo se presenta cuando una superficie no emite o refleja ningún tipo de radiación que incide sobre la superficie⁹¹.

Las tablas 16 y 17 muestran los coeficientes de determinación (r^2) más altos obtenidos de los modelos de regresión (múltiple y simple), así como los coeficientes de correlación de Pearson (r) que se realizaron para diferentes combinaciones de banda. En general, los coeficientes de correlación y de determinación son muy bajos, tanto para los modelos de regresión múltiples como simples.

Para las regresiones simples, el coeficiente de correlación de Spearman (r) mostró baja asociación entre variables, (entre 0,059 y 0,45); el coeficiente de determinación (r_a^2) explicó del 3% al 15,1%. Las regresiones múltiples presentaron bajos niveles de asociación (entre 0,41 y 0,51) y el coeficiente de determinación (r^2) logró explicar solo el 8% por tal razón, los estadísticos de regresión no son confiables para espacializar y analizar la concentración de la clorofila-a en el sistema de interés.

⁹¹ CHUVIECO, E. Op. cit. p. 54.

Tabla 16. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones simples en el Lago de Tota.

Bandas	r	r ²
b3/b4	0,059	0,003
b5	-0,2	0,04
Promedio(b3,b4)	0,388	0,151
b4	-0,300	0,090

Fuente: Autor.

Tabla 17. Combinación de bandas para Landsat-8 y la correlación establecida para la estimación de Clorofila-a, a partir de regresiones múltiples en el Lago de Tota.

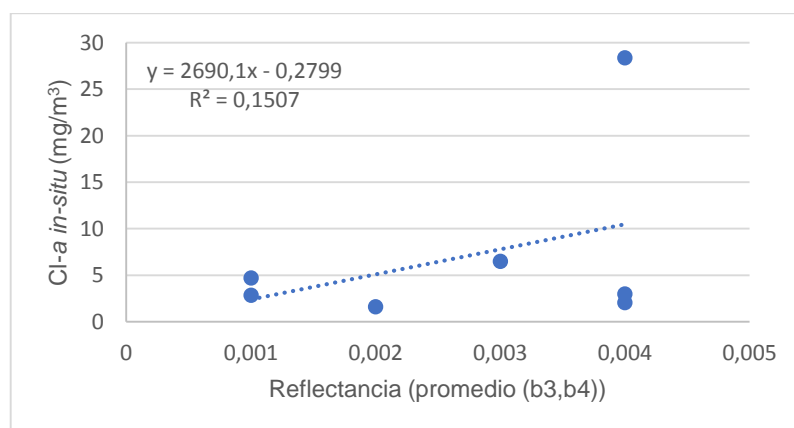
Bandas	r	r ²	r _a ²
Promedio(b4,b5), b3	0,416	0,173	0,008
b4,b5	0,455	0,207	0
b3,b4	0,482	0,232	0
Promedio(b3,b4), b5	0,514	0,264	0

Fuente: Autor.

No obstante, el modelo de regresión simple que presenta mejor bondad en el ajuste, corresponde a la combinación de bandas **promedio (b3 y b4)** (variable independiente), ya que explica el 15,1% de la variabilidad de la concentración de clorofila-a (variable dependiente) (Figura 28).

La expresión de la regresión lineal simple, fue seleccionada para el cálculo de la concentración de clorofila-a (ecuación 8), esta expresión permite estimar para 1 variable (X_1) en donde β_0 es el intercepto de la línea con el eje Y, y β_1 es la pendiente de la línea de regresión. Por lo tanto, para lago de Tota se obtuvieron los coeficientes de regresión para cada variable (Tabla 18) y la ecuación final (ecuación 9).

Figura 28. Regresión lineal simple que muestra la relación entre los valores de reflectancia y las concentraciones de clorofila-a medidas en campo.



Fuente: Autor.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Tabla 18. Estadísticas de la regresión seleccionada.

Variable	Coeficientes β
Intercepción	-0,279
X 1 (promedio b3,b4)	2690,1

Fuente: Autor.

$$Cl - a = 2690,1 * ((b3 + b4)/2) - 0,279 \quad (\text{Ecuación 9})$$

4.2.4 Validación del modelo. El modelo calculado sugiere que no existe una buena relación entre los valores de concentración de clorofila-a medidos *in-situ* y los calculados con datos satelitales. El coeficiente de variación (CV) promedio en cada una de las estaciones (Tabla 19) de muestreo es alto (68,19%), algunos datos como la estación 4, 12, 13 y 16 presentan una variabilidad mayor al 60%.

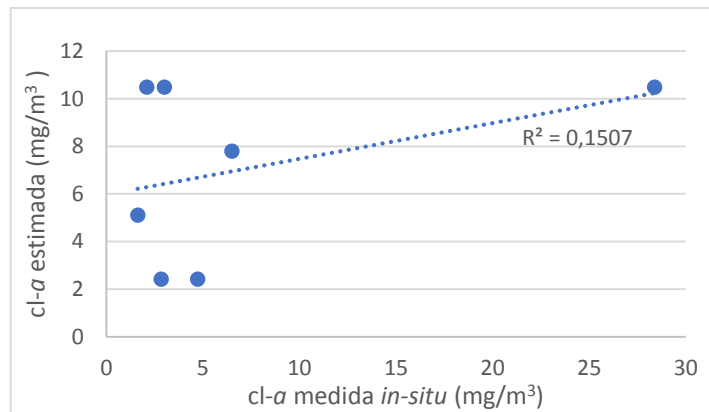
La figura 29, relaciona los valores de clorofila-a medidos *in-situ* y los calculados con datos satelitales, el coeficiente de determinación (r^2), muestra que solo el 15.07% de la variación total de los datos puede ser explicado mediante el modelo de regresión. Este resultado muestra que el modelo de regresión no es confiable para determinar las concentraciones de clorofila-a en el lago de Tota.

Tabla 19. Coeficientes de variación (CV) de los datos de clorofila-a tomados in-situ con respecto a los valores calculados de la información satelital para el Lago de Tota.

Estación	Cl-a <i>in-situ</i> (mg/m ³)	Cl-a calculada (mg/m ³)	CV (%)	CV (%) promedio
2	4,723	2,410	45,853	68,195
4	2,844	10,481	81,051	
5	1,625	2,410	27,518	
11	2,742	5,100	42,527	
12	3,047	7,790	61,898	
13	1,219	10,481	111,951	
16	1,473	10,480	106,567	

Fuente: Autor.

Figura 29. Relación entre los valores de clorofila-a estimada del modelo de regresión y los valores clorofila-a medidas *in-situ* para el Lago de Tota.

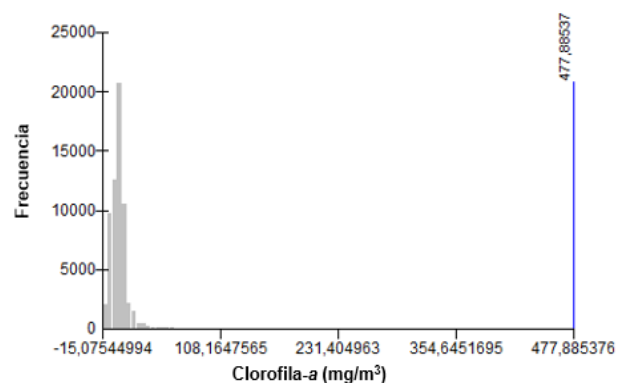
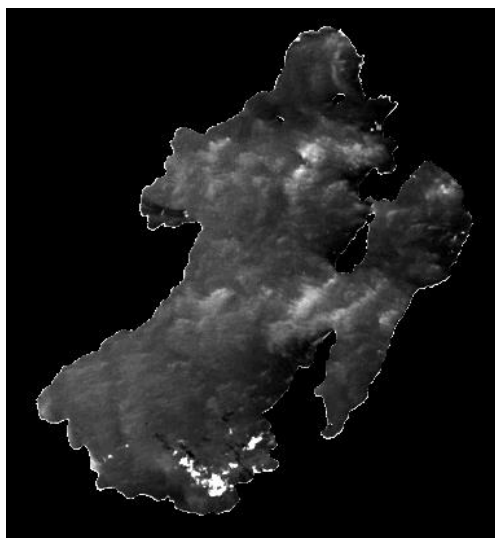


Fuente: Autor.

4.2.5 Aplicación del modelo. Como ejercicio, se aplicó el modelo a la imagen de enero de 2018, cuya salida gráfica presenta valores que oscilan entre el rango -15,07 y 477,8 (Figura 30): Se generaron dos series de datos atípicos para la estimación de clorofila-a: **1.** valores negativos de clorofila-a, que no son válidos, **2.** valores mayores a 30 mg/m³ que no suelen presentarse en sistemas de alta montaña, por lo que se presentan como “otros valores”.

Sin embargo, no se aplicó a todas las imágenes de satélite propuestas, para hacer el análisis temporal, debido a la baja confiabilidad del modelo calculado.

Figura 30. Izquierda, salida gráfica de la distribución espacial de la concentración de clorofila-a, aplicación del modelo en el Lago de Tota (enero de 2018). Derecha, histograma de la concentración de clorofila-a.

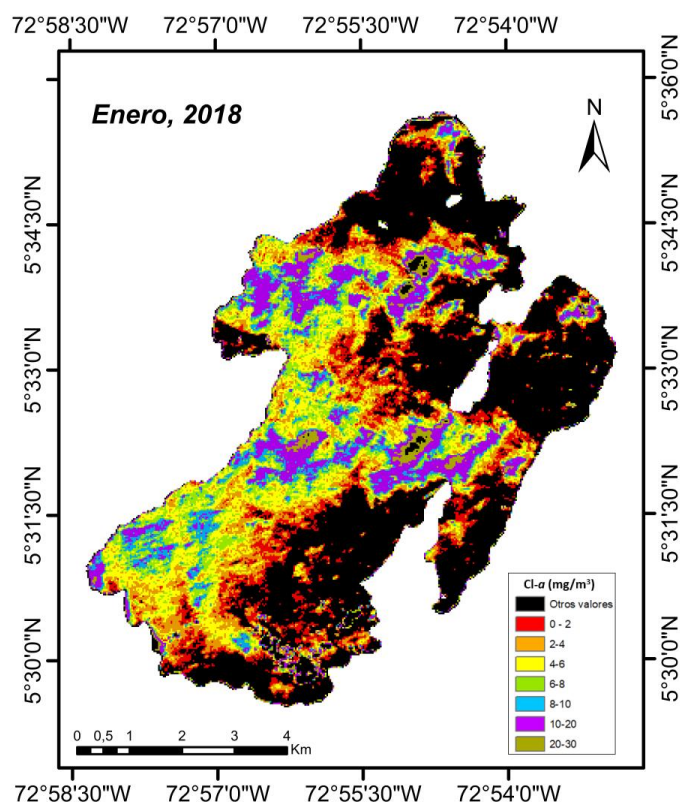


Fuente: Autor.

4.2.6 Variación espacial de clorofila-a. La distribución de la concentración de clorofila-a no presentó un patrón claro a nivel espacial, excepto el litoral del lago, el cual expresó el rango más alto de concentración ($20\text{-}30\text{ mg/m}^3$). Se resalta que la mayoría de zonas registraron pérdida de información debido a la presencia de datos atípicos (Figura 31), especialmente la 1, 3 y 6.

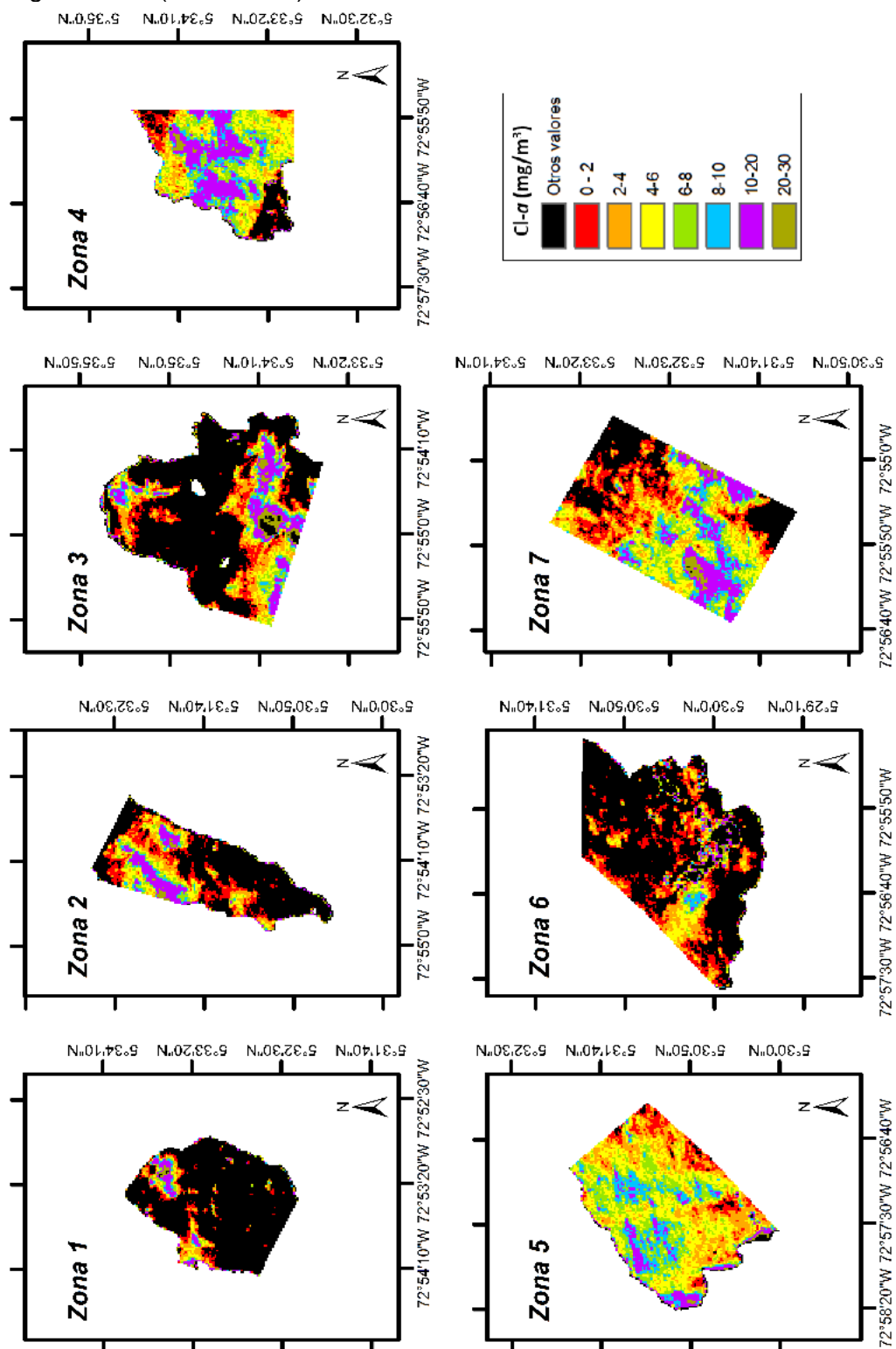
A pesar de la heterogeneidad en la concentración de clorofila-a, el rango que predomina en todas las zonas es de $4\text{-}6\text{ mg/m}^3$ (Figura 32). No obstante, ciertos sectores registraron: valores altos ($20\text{-}30\text{ mg/m}^3$) en las zonas 3, 4, 6 y 7, valores más bajos ($0\text{-}2\text{ mg/m}^3$) en las zonas 2, 3, 6 y 7, y, valores intermedios ($8\text{-}20\text{ mg/m}^3$) en las zonas 4, 5 y 7.

Figura 31. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a en el Lago de Tota para enero 2018.



Fuente: Autor.

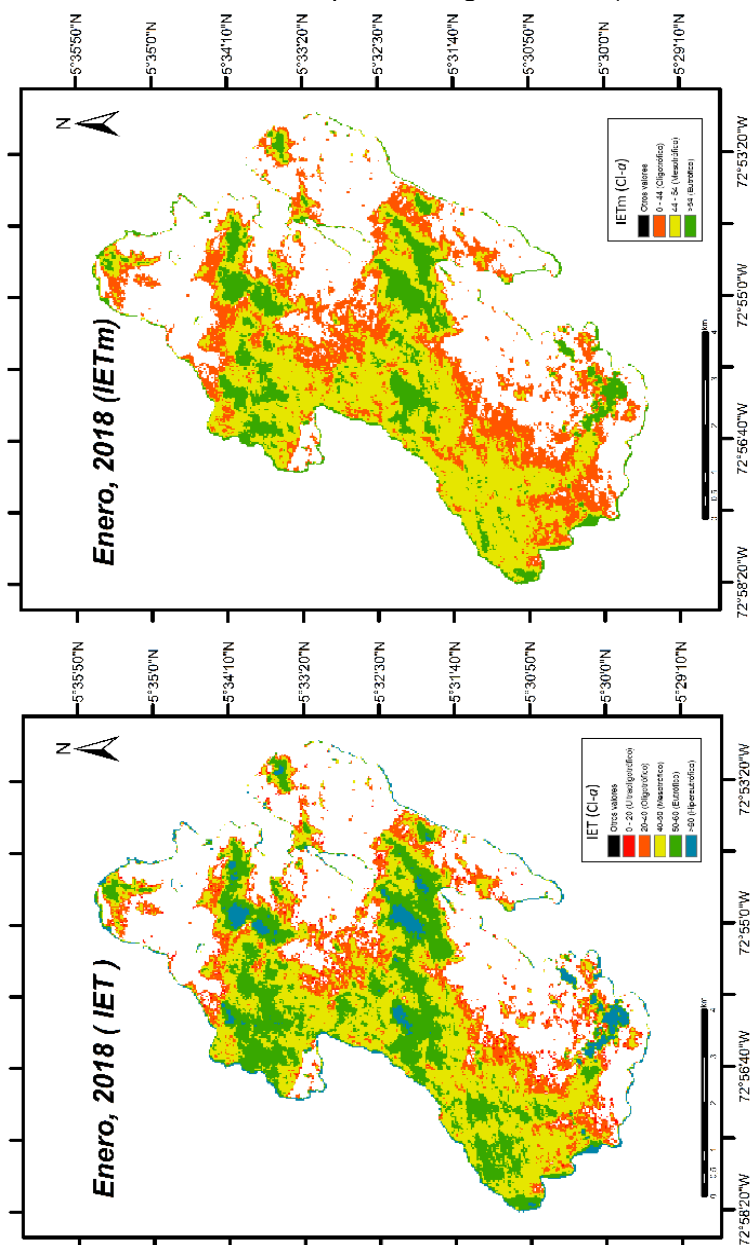
Figura 32. Distribución espacial de la concentración de clorofila-a para cada zona en el Lago de Tota (enero 2018).



Fuente: Autor.

4.2.7 Valoración del estado trófico (IETm). En términos generales, se puede categorizar al Lago de Tota como un sistema mesotrófico, debido a la tendencia de cada una de las zonas a expresar esta condición (Figura 33). No obstante, todas las zonas presentaron sectores con condiciones de oligotrofia y eutrofia, lo cual se evidenció con la aplicación de los dos índices. En el caso del IET, se presentaron las categorías tróficas contrastantes: hipereutrófico (zonas 5, 7,2) y ultra oligotrófico (zonas 1, 2, 3, 6).

Figura 33. Índices de estado trófico de Carlson (IET) y Carlson modificado (IETm) a partir de la concentración de clorofila-a, para el Lago de Tota (enero 2018).



Fuente: Autor.

5. ANÁLISIS

5.1 CIÉNAGA AYAPEL

5.1.1 Información Satelital. Las imágenes utilizadas en este caso, presentan correcciones radiométricas y geométricas de alta calidad, sin embargo, las imágenes pertenecientes a las fechas: julio de 2014 y enero de 2017, presentaron valores negativos en la banda 5 (NIR) del espectro electromagnético, lo que sugiere que para estos casos particulares puede existir error en el preprocesamiento, es decir, los algoritmos que establecen el programa de Landsat-8 (SR), no se ajustan a todos los datos satelitales.

El presente estudio, evidenció que la distinción de valores de reflectancia espectral en cada pixel de las imágenes de satélite, indica que existe variación de concentración de clorofila-a. Esta variabilidad depende de las propiedades ópticas del agua, que están determinadas por la mezcla de componentes como: fitoplancton, partículas inorgánicas, coloides y materia orgánica disuelta⁹² y por lo tanto pueden ser identificadas mediante las diferentes bandas del espectro electromagnético.

El modelo estimado para el cálculo de clorofila-a, sugiere el uso de las bandas: azul (b2), verde (b3) y la combinación roja/infrarrojo cercano (b4/b5). Normalmente, los modelos de estimación de clorofila-a para diferentes sensores, establecen buena correlación con las bandas de la región visible del espectro electromagnético. Sin embargo, para Landsat-8 los estudios^{93,94} reportan el uso de la banda 5 (NIR), ya que “se correlaciona con un incremento en la dispersión de partículas, por lo que tiende a aumentar cuando se incrementa la concentración de clorofila-a, ya que la biomasa del fitoplancton aumenta. No obstante, los sólidos minerales en suspensión también contribuyen a ese incremento, en el caso de aguas turbias”⁹⁵.

El modelo estimado para la Ciénaga de Ayapel, permite calcular la concentración de clorofila-a a nivel espacio-temporal, ya que los parámetros estadísticos muestran buena correlación, sin embargo, la varianza explicada no es muy alta. En consecuencia, los errores derivados del modelo, pueden explicarse probablemente por la complejidad y dinámica del sistema. Otro factor que limita la confiabilidad del modelo, es el intervalo de tiempo entre la

⁹² DE MORALES, E, *et al.* Op. cit. p. 154.

⁹³ TENJO, C, *et al.* Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. En: UD y la geomática. Diciembre, 2014, vol. 9. p.37-47.

⁹⁴ NAS, B. *et al.* Op. cit. p. 375-382.

⁹⁵TENJO, C, *et al.* Op. cit. p. 45.

toma de datos de campo y la adquisición de la imagen satelital, ya que se ha descrito que debe ser lo más reducida posible, e incluso debe ser simultánea⁹⁶.

Por otro lado, se desconoce el error de las medidas de clorofila obtenidas *in-situ*, por lo que se cuestiona, si la calidad de los datos es adecuada, además la cantidad de estaciones de muestreo en campo pueden no ser suficientes, debido a la extensión del complejo cenagoso y a variabilidad de sus procesos funcionales.

5.1.2 Clorofila-a. La distribución de clorofila-a evidencia que la Ciénaga de Ayapel es un sistema muy heterogéneo y con alta dinámica, producto de la complejidad hidrológica y ambiental de la región, lo que se hizo evidente a nivel temporal como espacial.

Los patrones de concentración de clorofila-a reflejaron diferencias significativas en los momentos del pulso de inundación evaluados:

Con respecto al periodo de aguas bajas en ascenso, que se caracteriza por el aumento: del área inundada, precipitación directa, escorrentía de las cuencas que tienen influencia y la conexión directa con ríos y caños que llegan a la ciénaga⁹⁷, se evidenció variabilidad espacial notable en la concentración de clorofila-a, en sentido norte-sur y según la clasificación trófica (IETm) la región norte de la ciénaga presenta categoría de mesotrófico y oligotrófico y la región sur, la categoría de eutrófico.

Dada la heterogeneidad espacial de este periodo hidrológico y la zonación considerada, en general se destacó:

- La zona 1 con los valores más altos de clorofila-a. En esta zona, los procesos de transformación a nivel de cuenca son evidentes por actividades agrícolas, ganaderas y mineras lo que explica posiblemente que el crecimiento de la biomasa del fitoplancton estuvo determinado por el aporte de nutrientes y materia orgánica, que por procesos de escorrentía llegan a la ciénaga.⁹⁸. Además, según lo reportado por Bayley⁹⁹, durante la inundación, los nutrientes previamente mineralizados durante la fase seca se disuelven y se presentan altas tasas de productividad primaria.

⁹⁶ NAS, B. *et al.* Op. cit. p. 375.

⁹⁷ JUNK, W., WANTZEN, K. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications, an update. Welcomme R, T. Petr. Edit. Proceeding of international Symposium on the Management of Large River for Fisheries. Bangkok, Thailand. 2004. p. 122.

⁹⁸ YAN, Xiao, *et al.* Op. cit. p. 202.

⁹⁹ BAYLEY, P. Understanding Large River-Floodplain Ecosystems. Significant economic advantages and increased biodiversity and stability would result from restoration of impaired systems. En: BioScience, Ecology of Large Rivers. 1995. Vol. 45.no. 3. p. 154.

- Las zonas 3 y 6, registraron valores medios, sin embargo, la zona 3 también registró valores altos de clorofila, en los sectores con influencia de las descargas de aguas residuales del municipio de Ayapel, producto del enriquecimiento de nutrientes¹⁰⁰.

- Las zonas 2, 4 y 5 registraron los valores más bajos. Estas zonas están influenciadas por: cuenca del río Cauca y Caño Barro (una de las cuencas más grandes que drenan a la ciénaga) (zona 2), subcuenca del Caño Muñoz (zona 4), y la conexión con el Río San Jorge por medio de los caños: Grande y Viloría (zona 5). La magnitud de estas cuencas y el flujo que ingresa a la ciénaga favorecen los procesos de: re suspensión de sedimentos, incremento en la cantidad de sólidos suspendidos y disueltos (zonas con valores altos de conductividad), aumento de la turbidez y por lo tanto, reducción considerable de la transparencia del agua, así como la penetración de la luz, factor que limita el establecimiento de las comunidades fitoplanctónicas¹⁰¹.

Las zonas 2 y 4, presentaron áreas particulares con valores altos de clorofila-a. En el caso de la zona 2, en el sector Escobillas y Escobillitas y en la zona 4, en el sector más hacia el norte. El aumento en la biomasa en estos sectores indica que se desarrollaron características fisicoquímicas y biológicas diferenciales a las del cuerpo principal, asociados posiblemente a procesos de: aislamiento, incremento en el lavado de sustancias, incremento de la temperatura¹⁰², disminución del efecto de herbivoría y aumento en la relación nutrientes/clorofila¹⁰³.

El periodo de aguas altas, que se caracteriza por la expansión del litoral de la ciénaga, producto de la inundación de la llanura aluvial asociada al aumento de la precipitación regional y el desbordamiento de los sistemas lóticos¹⁰⁴, presentó una tendencia diferente al periodo hidrológico anterior. En general, la concentración de clorofila-a indicó un incremento hacia el interior de la ciénaga y disminución hacia el litoral. Por lo tanto, la clasificación trófica (IETm), evidenció que se presentaron: la categoría de eutrófico en la zona limnética, y de mesotrófico y oligotrófico en el litoral.

Lo anterior sugiere que, la ciénaga se encontraba en el momento de estabilización (final del periodo hidrológico), posterior a procesos de fertilización. Por lo tanto, en la zona limnética (zona 6), la decantación de

¹⁰⁰ YAN, Xiao, *et al.* Op. cit. p. 202.

¹⁰¹ HERNÁNDEZ, Esnedy, *et al.* Relación entre la determinación del pigmento Clorofila-a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). Op. cit. p. 163.

¹⁰² JUNK, W., WANTZEN. Op. cit. p. 126.

¹⁰³ HUSZAR, V, *et al.* Nutrient-chlorophyll relationships in tropical, subtropical lakes: do temperate models fit? *En: Biogeochemistry*. 2006, vol. 79. p. 246-247.

¹⁰⁴ JUNK, W., WANTZEN. Op. cit. p. 119.

sedimentos es notable, lo que hace que disponibilidad de luz no sea un factor limitante para el crecimiento del fitoplancton¹⁰⁵. Por el contrario, el litoral de las zonas 1, 3, 4 y 5 está influenciado por el arrastre y depositación directa de grandes cantidades de materia orgánica e inorgánica, provenientes de los afluentes: Quebradona, , Caño Barro, y el Río San Jorge y las descargas del municipio de Ayapel¹⁰⁶; lo que genera un ambiente muy turbio y menos productivo.

Se resalta que, la zona 1 presentó las concentraciones de clorofila-a más bajas, asociadas posiblemente al incremento de la entrada de material suspendido y disuelto, que es lavado de una de las cuencas influenciadas por extracción minera. Por otro lado, aunque la zona 3 se destaca por la descarga de aguas residuales, en este periodo, las concentraciones de clorofila-a fueron bajas, posiblemente debido a efecto de dilución de nutrientes, como lo reporta Chalarca y colaboradores¹⁰⁷ la influencia de los vertimientos en la calidad del agua es menor en esta época y por lo tanto la biomasa del fitoplancton es baja.

El periodo de aguas altas en descenso, señaló una condición particular en las dos fechas (marzo 2014 y diciembre 2015), ya que evidenció un cambio en el patrón típico de variación del volumen almacenado y, por lo tanto, contraste en el área inundada de la ciénaga, esto asociado posiblemente a variaciones en los patrones climáticos de las cuencas aportantes. Lo anterior incidió en la respuesta de las comunidades fitoplanctónicas, ya que se evidenció a nivel espacial, diferencia en de concentración de clorofila-a, y por lo tanto en la expresión de la condición trófica. En consecuencia, el IETm permitió clasificar la ciénaga en la categoría de eutrófico en enero y de mesotrófico en diciembre.

En marzo se mantuvo un patrón espacial similar al periodo de aguas altas, ya que registraron valores de clorofila-a altos hacia el interior de la ciénaga, sin embargo, las concentraciones son más altas en este periodo y la distribución es homogénea. Este hecho puede deberse a que en la fase de descenso se incrementa: la transparencia del agua, la temperatura y se aprovechan los nutrientes que ingresaron al sistema en el periodo anterior¹⁰⁸, lo que favorece la productividad.

¹⁰⁵ HERNÁNDEZ, Esnedy, *et al.* Relación entre la determinación del pigmento Clorofila-a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). Op. cit. p. 163.

¹⁰⁶GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN Y MODELACIÓN AMBIENTAL, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL SINÚ Y DEL SAN JORGE. Op. cit. p. 6-361.

¹⁰⁷CHALARCA, D., MEJÍA, R. AGUIRRE, N. Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. En: Revista facultad de ingeniería. Junio, 2007, no. 40. p. 41-58.

¹⁰⁸ MONTOYA, Yimmy y AGUIRRE, Néstor. Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (Ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. Op. cit. p. 86.

Es importante mencionar, que la zona 1 presentó un comportamiento particular, ya que mantiene valores medios de clorofila-a y a diferencia de las demás zonas no se evidencia cambios significativos a nivel espacial.

En contraste con marzo, diciembre, registró menores concentraciones de clorofila-a, y teniendo en cuenta que, en el 2015 se presentó el fenómeno de El Niño, se asume que el aporte de materia orgánica y nutrientes que ingresaron a la ciénaga se dieran en menores proporciones, debido a la disminución de las precipitaciones regionales y por lo tanto disminución de la conectividad de la ciénaga con los ecosistemas lóticos¹⁰⁹. Sin embargo, también se registraron valores medios de clorofila-a en la zona 1, 3 y 5.

En el periodo de aguas bajas, las concentraciones de nutrientes son mayores debido a los efectos de mineralización y re-suspensión de partículas orgánicas¹¹⁰ que se mantienen como un recurso disponible en la columna de agua¹¹¹, el viento facilita el proceso de mezcla y aumenta la dinámica del sistema, además, el incremento en la temperatura en esta época, favorece el crecimiento del fitoplancton¹¹². Por la influencia de estos factores, la tendencia de este periodo fue mostrar altas concentraciones de clorofila-a, tanto a nivel espacial como temporal y por lo tanto la condición trófica de eutrófico a nivel general.

Sin embargo, la distribución espacial de clorofila-a fue diferente para las dos fechas evaluadas. Mayo sugiere la continuación del patrón de los dos periodos anteriores, es decir, incremento de concentración hacia el interior de la ciénaga, mientras que, abril mantiene la tendencia del periodo de aguas bajas en ascenso, en donde las concentraciones de clorofila-a son mayores en el sector sur de la ciénaga.

Es conveniente destacar que, las zonas 1, 2 y 3 presentaron un incremento significativo en la concentración de clorofila-a del año 2016 a 2017, zonas con mayor intervención antrópica en las cuencas. La zona 3 en particular, incidió en mayor proporción en el aumento de concentración de clorofila-a, debido al

¹⁰⁹ JUNK, W., WANTZEN. Op. cit. p. 119.

¹¹⁰ MONTOYA, Y y AGUIRRE, N. Aproximación multivariada a la dinámica del ensamblaje algal epifítico en un sistema de planos inundables tropical. Investigación, Biodiversidad y Desarrollo 2012, vol. 31, no.2. p. 90.

¹¹¹ CARVALHO, M. Efeitos da flutuação do nível da água sobre a densidade e composição do zooplankton em um Lago de Várzea da Amazônia, Brasil. Citado por: ANDRADE, C *et al.* efectos de la fluctuación del nivel del agua sobre la estructura del ensamblaje de rotíferos en el Lago Largo (sistema Yahuaraca, llanura de inundación del Río Amazonas - Colombia). En: Limnología. 2011, vol. 33, no. 2. p. 530.

¹¹² MONTOYA, Y y AGUIRRE, N. Aproximación multivariada a la dinámica del ensamblaje algal epifítico en un sistema de planos inundables tropical. Op cit. p. 91.

aporte significativo de nutrientes y adicionalmente como lo reporta¹¹³, en la época de estiaje, los niveles de agua que posee la ciénaga no tienen la capacidad de amortiguar dichas descargas.

En general se evidenciaron dos patrones de distribución de clorofila-a tanto a nivel espacial como temporal: **1.** Concentraciones mayores en el interior de la ciénaga y los menores hacia el litoral **2.** Concentraciones mayores en el sector sur y menores en el sector norte, la cual se relaciona con la zonificación ambiental propuesta en este estudio. La expresión de dichas condiciones dependerá del periodo hidrológico, así como de las características limnológicas asociadas a la cantidad de nutrientes, sólidos totales, disponibilidad de luz¹¹⁴.

Finalmente, es importante resaltar que, estudios realizados en los años 2005-2008, describieron que los rangos de clorofila-a relacionaron a la Ciénaga de Ayapel en la categoría trófica de oligotrófico¹¹⁵ a mesotrófico¹¹⁶. Sin embargo, el presente estudio sugiere evolución en la condición trófica, ya que la mayoría de los periodos hidrológicos ubican a la ciénaga como un sistema eutrófico, lo que sugiere un aumento en la concentración de nitratos y fosfatos en el agua, que actúan como nutrientes para el fitoplancton, produciendo un incremento notable de su biomasa¹¹⁷.

5.2 LAGO DE TOTA

5.2.1 Información satelital. La presencia de valores de reflectancia muy bajos (en el orden de 1×10^{-3} e incluso de 0), y valores negativos en las diferentes longitudes de onda, indica que existen anomalías en el preprocesamiento de las imágenes de satélite. Por este motivo se consultó directamente con el Servicio Geológico de los estados Unidos (USGS), proveedor de las imágenes Landsat-8 (SR), el cual expuso que los algoritmos de recuperación atmosférica y radiométrica no son ideales para cuerpos de agua debido a los bajos niveles de reflectancia, y en consecuencia la baja relación señal/ruido, por lo que el programa Landsat planea a futuro la integración de nuevos algoritmos para la

¹¹³ CHALARCA, D., MEJÍA, R. AGUIRRE, N. Op. cit. 58.

¹¹⁴ HERNÁNDEZ, Esnedý, *et al.* Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. Op. cit. p. 78.

¹¹⁵ HERNÁNDEZ, E, *et al.* Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes lénticos de Colombia. Op. cit. p. 222.

¹¹⁶ HERNÁNDEZ, E, *et al.* Relación entre la determinación del pigmento Clorofila-a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). Op. cit. p. 166

¹¹⁷ TENJO, C, *et al.* Op. cit. p. 38.

recuperación cuantitativa de los constituyentes de la columna de agua ¹¹⁸ (Ver anexo A).

Además, según lo reportado por Chuvieco¹¹⁹, factores como: materiales en suspensión (clorofila, sedimentos y nutrientes) y la profundidad, influyen en el aporte de reflectancia de agua; por lo que, los niveles de reflectancia son mayores en aguas con alto contenido de material en suspensión y poco profundas (debido al efecto que ejercen materiales en el fondo del sistema). Contrario a las características del Lago de Tota que, por ser un ecosistema de alta montaña, registra alta transparencia, baja concentración de sólidos disueltos y suspendidos, y además es un sistema profundo (profundidad media 30 m)¹²⁰.

Ji y colaboradores¹²¹ reportaron para imágenes Landsat-TM, que la profundidad máxima a la que puede determinarse los niveles de reflectancia es a 6,4 m en la banda azul, 3 banda verde y 2,1 en la roja.

A pesar de lo anterior, como ejercicio se estimó el modelo para el cálculo de clorofila-a, el cual sugiere el uso del promedio de los valores de reflectancias de las bandas: verde (b3) y roja (b4), franjas de máxima reflectividad de la clorofila-a¹²². El modelo de regresión presentó baja significancia estadística y por lo tanto no es adecuado para el cálculo de la concentración de clorofila-a tanto a nivel espacial como temporal.

Los errores derivados del modelo, están asociados a las características del lago, y por lo tanto se generaron valores muy bajos de reflectancia, así como los valores negativos en ciertas bandas, lo que impidió incluir la totalidad de las estaciones de muestreo al modelo de regresión.

5.2.2 Clorofila-a. Si bien los datos de clorofila-a *in-situ* no evidenciaron diferenciación a nivel espacial evidente, los datos obtenidos del modelo de regresión, muestran un sistema muy heterogéneo con rangos muy variables de clorofila-a. Aunque se evidencia también la pérdida de información producto de los valores atípicos generados en el modelo.

A pesar de que el modelo no se encuentre dentro de los rangos de error aceptable, se evidenciaron algunos patrones interesantes referidos a: **1.** los valores máximos calculados, en especial en las zonas 2, 4, 6 y 7 las cuales presentan sectores en la categoría trófica de eutrófico. La zona 2, está

¹¹⁸ SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS.

¹¹⁹ CHUVIECO, Op. cit. p. 62.

¹²⁰ HERNÁNDEZ, Esnedy, *et al.* Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes lénticos de Colombia. Op. cit. p. 216-228.

¹²¹ JI, *et al.* citado de CHUVIECO. Op. cit. p. 62.

¹²² TENJO, C, *et al.* Op. cit. p. 45.

influenciada por la desembocadura de los ríos el Tobal y La Mugre, este último con alta carga orgánica producto de los vertimientos de aguas residuales del municipio de Aquitania; en la zona 4 se desarrolla actividad acuícola; la zona 6, influenciada por el río Olarte, cuya cuenca se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas y la zona 7 que corresponde a la zona limnética. Donde estudios previos han determinado que pueden expresarse valores altos de clorofila-a y de nutrientes especialmente fósforo^{123,124}.

2. Los valores más bajos se encuentran en las zonas 2, 6 y 7, las cuales presentan condiciones de oligotrofia, característico de sistemas tropicales de alta montaña, 3. el litoral presenta valores más altos de clorofila-a, esto posiblemente asociado al desarrollo de la vegetación acuática flotante y sumergida, que sumado al aporte de nutrientes lavado de las cuencas, suele ser un ambiente muy productivo¹²⁵, lo que puede modificar el color aparente del agua e incidir sobre la reflectancia, además del posible efecto del reflejo de la vegetación terrestre sobre el espejo de agua, que para el caso del lago de Tota se acentúa en la zona Occidental u Oriental según la hora del día.

En general, no se evidencia un patrón claro de distribución de clorofila-a, ya que las zonas propuestas presentaron valores bajos, medios y altos. El índice de estado trófico (IETm), categoriza al Lago de Tota como un sistema mesotrófico a eutrófico, en contraste con lo reportado por los estudios ^{126,127}, que sugieren una condición oligotrófica a mesotrófica. Las zonas con mayor productividad están asociadas a incremento de nutrientes que ingresan al sistema especialmente por actividades agrícola, ganadera, acuícola y los vertimientos de aguas residuales.

Aunque el modelo no haya sido confiable, se presentan zonas con alta proporción en las categorías eutrófico, ya que el incremento de la biomasa algal es notable y se genera deterioro de la calidad de agua, lo que coincide con lo reportado por Aranguren y colaboradores¹²⁸.

¹²³ UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Flujo de nutrientes (C, N y P) en el Lago de Tota: análisis de fuentes y biocaptación. Op. cit. 49 p.

¹²⁴ ARANGUREN, N, *et al.* Amino acid composition reveals functional diversity of zooplankton in tropical lakes related to geography, taxonomy and productivity. En: Oecologia. Abril, 2018.

¹²⁵ ROLDÁN, G y RAMÍREZ, J. Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Ed. 2. 2008. p. 308.

¹²⁶ HERNÁNDEZ, E, *et al.* Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes lénticos de Colombia. Op. cit. p. 222.

¹²⁷ UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Flujo de nutrientes (C, N y P) en el Lago de Tota: análisis de fuentes y biocaptación. Op. cit. 49 p.

¹²⁸ ARANGUREN, N, *et al.* Op. cit. 12 p.

4. CONCLUSIONES

- Las imágenes de satélite son una herramienta complementaria a las técnicas *in-situ* de monitoreo de ecosistemas acuáticos. Sin embargo, Landsat-8 (SR) tiene limitaciones que deben ser consideradas en el momento de evaluar ecosistemas acuáticos: 1. los algoritmos de recuperación atmosférica implementados por el programa, no son adecuados para sistemas muy profundos y con baja concentración de componentes ópticamente activos (fitoplancton, materia disuelta y suspendida). 2. No es posible acceder a todas las imágenes captadas por el satélite, debido al alto registro de nubosidad en periodos de lluvias.
- La ecuación determinada para el cálculo de concentración de clorofila-a en la Ciénaga de Ayapel, se derivó de un modelo de regresión múltiple que relaciona la reflectancia de las combinaciones de bandas: b2 (azul), b3 (verde) y b5/b4 (Infrarrojo cercano/roja) y los datos *in-situ* de clorofila-a. La estadística de regresión mostró que la varianza explicada no es muy alta ($r^2=0,563$), sin embargo, se consideró adecuada para el análisis espacial y temporal.
- La ecuación seleccionada para el cálculo de la concentración de clorofila-a en Lago de Tota, se derivó de un modelo de regresión simple, que relaciona la reflectancia del promedio de las bandas b3 (verde) y b4 (roja) y los datos *in-situ* de clorofila-a. El coeficiente de determinación logró explicar el 15.1% de la variabilidad de los datos, este valor es muy bajo y, por lo tanto, no era confiable para replicar en las diferentes imágenes de satélite propuestas en este estudio en el lago.
- La distribución de la clorofila-a en la Ciénaga de Ayapel evaluados en 8 imágenes de satélite comprendidas en el periodo 2014-2017, mostraron un sistema muy heterogéneo y con alta dinámica, lo que se hizo evidente a nivel temporal como espacial, producto de las condiciones deferenciales del pulso de inundación y factores como disponibilidad de la luz y nutrientes.
- En la Ciénaga de Ayapel, la concentración de clorofila-a registró dos patrones de variación orientados en sentido: 1. norte-sur (mayor concentración en la zona sur) en los periodos de aguas bajas en ascenso y aguas bajas (abril) 2. del litoral hacia la zona limnética de ciénaga (mayor concentración en el interior) en los periodos de aguas altas, aguas altas en descenso y aguas bajas (mayo).
- En el Lago de Tota, a pesar de la limitación de la herramienta y como una aproximación eco-ambiental, la distribución de la concentración de clorofila-a sería muy heterogénea y compleja, por lo que no presentó un patrón de variación claro. Sin embargo, se evidenció que los valores más elevados de

clorofila-a se encontraron en zonas con influencia de alta concentración de nutrientes como: áreas de desembocadura de tributarios y otras fuentes puntuales como truchifactorías.

- La condición trófica, calculada con el IETm relacionado con el contenido de clorofila-a, categorizó a la Ciénaga de Ayapel, como un sistema eutrófico ya que la mayoría de los periodos evaluados presentaron esta condición, sin embargo, también se evidenciaron cambios en estado trófico a nivel espacial, según los patrones descritos anteriormente. Además, se sugiere una evolución hacia incremento del estado trófico, lo que incide en la calidad ecológica del sistema.

- Según el IETm, el Lago de Tota se categorizó como un sistema mesotrófico, debido a que a nivel espacial se presentó en mayor proporción esta condición, sin embargo, se evidenciaron sectores asociados a las categorías: oligotrófico y eutrófico. Asociados a la forma, origen, dinámica del cuerpo de agua, de la productividad del litoral y de la influencia de actividades antrópicas.

5. RECOMENDACIONES

- Se sugiere, explorar el uso de otros sensores con mayor resolución espectral, para la obtención de algoritmos que permitan establecer criterios de calidad de agua, como los satélites Sentinel 2 y Sentinel 3, con la limitante que la información solo está disponible desde el año 2015.
- Ampliar el uso de la herramienta a otros tipos de sistemas acuáticos en Colombia y promover el monitoreo sistemático en escenarios de cambio global.
- Se recomienda mejorar los algoritmos utilizados por el programa Landsat-8 (SR) para que la información satelital sea viable para el monitoreo de ecosistemas acuáticos, especialmente en sistemas profundos y con bajo contenido de material suspendido y disuelto.
- Se recomienda, estandarizar las metodologías *in-situ* de muestreo y cuantificación de la concentración de clorofila-*a*.
- Para futuras investigaciones, se sugiere incorporar más estaciones de muestreo *in-situ*, que abarquen en lo posible la mayor extensión del cuerpo de agua. Esto con el fin de que los modelos derivados de la información satelital sean más robustos y confiables.
- Se sugiere contrastar los resultados obtenidos de los modelos de regresión de las imágenes de satélite con los datos de campo en diferentes fechas, y complementar dicha información con otras variables *in-situ* como: nutrientes, transparencia, sólidos totales, alcalinidad.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, L.C. La ciudad sostenible: dependencia ecológica y relaciones regionales; un estudio de caso en el área metropolitana de Medellín, Colombia. Citado por HERRERA, A. Ecosistemas estratégicos, análisis crítico del concepto fundamentos. Medellín, 2014.

AGUILERA, María. Ciénaga de Ayapel: Riqueza en biodiversidad y recursos hídricos. Documentos de trabajo sobre economía regional. Banco de la República. Cartagena de Indias. 2009. No. 112.

AGUIRRE, N, et al. Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia. 2005.

AGUIRRE, R. Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos *in-situ*. En: Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 2015. No. 86.

ANDRADE, C *et al.* efectos de la fluctuación del nivel del agua sobre la estructura del ensamblaje de rotíferos en el Lago Largo (sistema Yahuaraca - llanura de inundación del Río Amazonas - Colombia). En: Limnología. 2011. Vol. 33, No. 2.

ARANGUREN, N, *et al.* Amino acid composition reveals functional diversity of zooplankton in tropical lakes related to geography, taxonomy and productivity. En: Oecologia. Abril, 2018.

ARMADA NACIONAL. Informe final levantamiento topográfico, batimétrico y sedimentológico Laguna de Tota. Centro de Investigaciones Oceanográfico. Cartagena de Indias. 1998.

BAYLEY, P. Understanding Large River-Floodplain Ecosystems. Significant economic advantages and increased biodiversity and stability would result from restoration of impaired systems. En: BioScience Vol. 45, No. 3. Ecology of Large Rivers. March, 1995.

BERMÚDEZ y MORENO. Estudio de la comunidad fitoplanctónica en el Lago de Tota. Trabajo de grado pregrado. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Básicas. Tunja. 2002.

BOCHAROV, Alexander, *et al.* Monitoring of Chlorophyll in Water Reservoirs Using Satellite Data. En: Journal of Applied Spectroscopy. March-April, 2017. Vol. 84, No. 2.

BONANSEA, M, *et al.* Concentración de clorofila-*a* y límite de zona fótica en el embalse. Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2. En: Ambiente y agua. 2012. Vol. 7, No. 3.

CARDOZO, A y PITA, S. Estudio de la estructura cualitativa y cuantitativa de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Tota. Sector Lago Chico (Aquitania-Boyacá), tesis de pregrado.

CARLSON, R. A trophic state index for lakes. En: Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, No. 2.

CASTELLANO, S. Trophic State Analysis of Selected Water Bodies in Grand Teton National Park. Tesis Master. Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering. 2013.

CHALARCA, D., MEJÍA, R. AGUIRRE, N. Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. En: Revista facultad de ingeniería. Junio, 2007. No. 40.

CHUVIECO, E. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Ariel S.A. Barcelona, 2002.

CONPES. Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota. Consejo Nacional de Política Económica y Social, 3801. Bogotá. 2014.

DUAN, H, *et al.* Assessment of chlorophyll-*a* concentration and trophic state for lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. En: Environmental Monitoring and Assessment. 2007, Vol. 129.

DE MORALES, E, *et al.* Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. En: Limnology. 2006, Vol. 7.

GONZÁLEZ, A., ARANGUREN, N., GAVIRIA, S. Cambios en la estructura de la población de *Boeckella gracilis* (Crustacea, Centropagidae) en el plancton del Lago de Tota, Boyacá, Colombia. En: Acta biológica. 2008, Vol. 13. No. 2.

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN Y MODELACIÓN AMBIENTAL, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL SINÚ Y DEL SAN JORGE. Plan de manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel. Medellín. Universidad de Antioquia. Junio, 2007.

HERNÁNDEZ, E, et al. Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. En: Acta Biológica. 2008. Vol. 30, No. 88.

HERNÁNDEZ, E, et al. Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes lénticos de Colombia. En: Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Diciembre, 2013. No. 69.

HERNÁNDEZ, E, et al. Relación entre la determinación del pigmento Clorofila-a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). En: Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Septiembre, 2011. No. 60.

HERNÁNDEZ, J. procesamiento digital de imágenes, actualización del capítulo "Percepción Remota" publicado en el libro "Manejo y Conservación de Recursos Forestales". Santiago de Chile. 2011.

HERRERA, A. Ecosistemas estratégicos, análisis crítico del concepto. Fundamentos conceptuales para formalizar la aplicación de la noción de ecosistema estratégico en los ejercicios de planificación y gestión del territorio. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2014. Tesis de maestría.

HUSZAR, V, et al. Nutrient–chlorophyll relationships in tropical, subtropical lakes: do temperate models fit?. En: Biogeochemistry. 2006. Vol. 79.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Cartografía base de Colombia. Escala 1:500.000. [En Línea]. Disponible en: <ftp://cartobase@cartografialibre.igac.gov.co>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de "El Niño" y "La Niña". [En Línea]. Disponible en: http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos-alertas/fenomenos-el-nino-y-la-nina/-/document_library_display/8joWMReTv53x/view/397201.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. 2007. Cap. 2.

JARAMILLO, Úrsula, et al. Colombia Anfibia. País de humedales. Vol 1. Bogotá: I.d. Alexander von Humboldt, 2016.

JARAMILLO, Juan. Cambios espacio-temporales del plancton en la ciénaga de Ayapel (Córdoba-Colombia), durante la época de menor nivel del agua. En: Limnología. 2012. Vol. 34.

JIMÉNEZ. Luz., CARVAJAL, Juan., AGUIRRE, Néstor. Las ciénagas como hábitat para los peces: estudio de caso en la Ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. En: Acta Biológica. 2010. Vol. 32, No. 92.

JUNK, W., WANTZEN, K. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications, an update. Welcomme R, T. Petr. Edit. Proceeding of international Symposium on the Management of Large River for Fisheries. Bangkok, Thailand. 2004.

KIRK, J. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Ed. 2. Cambridge University Press, Cambridge. 1994.

KRATZER, C and BREZONIK, P. Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida. Water resources Bulletin. 1981.

MANRIQUE. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. En: Ecosistemas. Enero – abril, 2003. Vol. 12. No. 1.

MARGALEF. R, *et al.* Limnología de los embalses españoles.

MARTÍNEZ, J. y DÍAZ, A. Fundamentos de Teledetección Espacial. Comisión Nacional del Agua. 2005. Disponible en internet: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>.

MAXWEEL, K and GILES, J. Chlorophyll fluorescence, a practical guide. En: Journal experimental Botany. 2002. Vol. 51. No. 59-60.

MERCANTE, C y TUCCI-MOURA, A. Comparação entre os índices de Carlson e Carlson modificado, aplicados a dois ambientes aquáticos subtropicais, São Paulo, SP. En: Acta Limnológica Brasiliensia. 1999. Vol. 11.

MONTOYA, Y y AGUIRRE, N. Aproximación multivariada a la dinámica del ensamblaje algal epifítico en un sistema de planos inundables tropical. Investigación, Biodiversidad y Desarrollo. 2012. Vol. 31. No. 2.

MONTOYA, Y y AGUIRRE, N. Dinámica de la producción primaria fitoplanctónica en un lago tropical (Ciénaga Escobillitas) a lo largo del pulso de inundación. En: Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia. Septiembre, 2010. No. 55.

MORENO, D y RAMÍREZ, J. Variación temporal de la condición trófica del lago del Parque Norte, Medellín (Antioquia), Colombia. Acta Biológica. 2010. Vol. 32, No. 92.

NAS. B. *et al.* Mapping chlorophyll-*a* through *in-situ* measurements and Terra ASTER satellite data. En: Environmental Monitoring Assessment. September, 2009. Vol. 157.

NEIFF, J. El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica.

NÚÑEZ, L, *et al.* Informe de batimetría Lago de Tota. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá. Diciembre, 2014.

ODUM, E. Ecología. Teoría de los sistemas ecológicos.

PINILLA, G. Prácticas de Limnología. Guías de laboratorio y campo. Universidad Nacional de Colombia, Ecología y Medio Ambiente. 2017.

PINTO A, VON., SPERLING, E., MOREIRA, R. Chlorophyll-*a* Determination Via Continuous Measurement of Plankton Fluorescence. Methodology Development..

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Lago de Tota, POMCA, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Bogotá. 2005.

RESTREPO, C. Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y el fósforo en la Ciénaga de Ayapel Tesis maestría en Recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. 2005.

REYNOLDS, C. The Ecology of Phytoplankton. Cambridge University press. Ed. 1. 2006.

RIVERA. *et al.* Comparación de la estimación e la clorofila-*a* mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. En: Acta Biológica Colombiana. 2005. Vol. 10. No. 2.

ROLDÁN, G y RAMÍREZ, J. Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Ed. 2. 2008.

SECRETARÍA DE LA CONVENCION DE RAMSAR. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, (Suiza). 2013.

SERVICIO GEOLÓGICO DE LOS ESTADOS UNIDOS.

SORIA, M y MATAR, M. Nociones sobre teledetección. Disponible en internet: <<http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-cátedra-para-Cartografía-Aplicada.pdf>>. 2016.

TENJO, C, *et al.* Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. En: UD y la geomática. Diciembre, 2014. Vol. 9.

THEOLOGOU, I. *et al.* Multitemporal Mapping of Chlorophyll-a in Lake Karla from High Resolution Multispectral Satellite data. En: Environmental Processes. May, 2016. Vol. 3.

TOLEDO, JR, *et al.* A aplicação de modelos simplificados para a avaliação e processo de eutroficação em lagos e reservatórios tropicais. 1983.

TUNDISI, J y MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnologia. Citado por TUNDISI, J. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. En: Estudos avançados. 2008. Vol. 22, No. 63.

U.S GEOLOGICAL SURVEY. (s.f.). Información general. [En Línea]. Disponible en internet: <https://lta.cr.usgs.gov/Landsat_8_C1.html#landsat_product_id>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Disponible en internet: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8 surface reflectance code (LASRC) product, product guide. Version 4.2. December, 2017.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. USGS-Science for a Changing World. (January 2015). Diccionario de datos de la colección Landsat. [En Línea]. Disponible en: https://lta.cr.usgs.gov/Landsat_8_C1.html#collection_category.

UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Efecto de variabilidad climática de un ciclo anual sobre el flujo de nutrientes (C, N y P), fuentes y biocaptación en el Lago de Tota. Convenio 092. 2015.

UNIDAD DE ECOLOGÍA EN SISTEMAS ACUÁTICOS. Flujo de nutrientes (C, N y P) en el Lago de Tota: análisis de fuentes y biocaptación. Convenio 012. 2014.

VILA, I. Los sistemas acuáticos continentales. Su ontogenia natural acelerada por efecto antrópico: la eutrofización y la salinización. CYTED-XVII. Santiago de Chile, 2003.

VOLLENWEIDER, R. Fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water, with particular reference to N and P as factors in eutrophication.

WETZEL, Robert. Limnology, Third Edition. 3rd ed. San Diego, 2001.

YAN, Xiao, et al. Mechanisms and assessment of water eutrophication. En: Journal of Zhejiang University Science B. 2008, vol. 9, no.3.

ZABALA, Ana. Diagnóstico ambiental de la Ciénaga de Ayapel a través de la variación temporal de los aspectos morfo funcionales del fitoplancton y un indicador de calidad ecológica. Tesis de maestría. Medellín. Universidad de Antioquia. 2016.

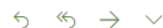
ANEXOS

Anexo A. Correo de comunicación con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

RE: [#28059]: Information



Zahia Catalina Merchan Camargo
Mer 04/04/2018, 10:47
USGS EROS User Services; ✉



Hello,

Thank you so much, it is helpful.

I have other question, because it isn't so clear for me,
Why the images have the negatives values? I'm working with an image (SR), it has a lot of negatives values in diferents bands.

Thank you.

De : USGS EROS User Services <custserv@usgs.gov>
Envoyé : mercredi 4 avril 2018 07:52
À : zahia1996@hotmail.com
Objet : [#28059]: Information

[#28059]: Information



USGS EROS User Services <custserv@usgs.gov>
Mer 04/04/2018, 11:42
Vous; ✉



Landsat atmospheric correction and surface reflectance retrieval algorithms are not ideal for water bodies due to the inherently low level of water leaving radiance, and the consequential very low signal to noise ratio. Similarly, surface reflectance values greater than 1.0 can be encountered over bright targets such as snow and playas. These are known computational artifacts in the Landsat surface reflectance products.

Quantitative remote sensing retrievals of water column constituents requires different algorithms, which are being considered for integration into future Landsat surface reflectance processing.

For additional information please review the Landsat Surface Reflectance Product Guides:
L4-5,L7: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf
L8: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf

Thank you,

Linda

USGS EROS User Services
[47914 252nd Street](https://landsat.usgs.gov)